

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту

(повна назва)

Кафедра прикладної математики

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження та порівняння різних
методів фільтрації звукових сигналів
для видалення фонових шумів

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання, групи ПМм-23-1

Вельгіщев А.С.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 113 Прикладна математика

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Прикладна математика

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Ситникова Ю. В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ПМ

(підпис)

Сидоров М.В.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту

Кафедра прикладної математики

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 113 Прикладна математика

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Прикладна математика

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри ПМ _____

(підпис)

“ 25 ” листопада 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Вельтіщеву Андрію Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження та порівняння різних методів фільтрації
звукових сигналів для видалення фонових шумів

затверджена наказом по університету від 22 листопада 2024 р. № 1223 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 6 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи додаток фільтрування аудіосигналу

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1. Аналіз предметної області

2. Вибір і обґрунтування методу розв'язання

3. Програмна реалізація

4. Результати обчислювального експерименту

5. Аналіз можливих застосувань

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій _____

1. Актуальність теми роботи _____

2. Постановка задачі _____

3. Аналіз предметної області _____

4. Метод чисельного аналізу _____

5. Результати обчислювального експерименту _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та вивчення технічної літератури за темою роботи	25 листопада – 1 грудня 2024 р.	виконано
2	Вибір та обґрунтування методу	2 – 8 грудня 2024 р.	виконано
3	Розробка алгоритму і програми	9 – 22 грудня 2023 р.	виконано
4	Проведення аналітичних досліджень та розрахунків	23 – 29 грудня 2024 р.	виконано
5	Робота над текстом пояснювальної записки	30 грудня 2024 р. – 9 січня 2025 р.	виконано
6	Представлення роботи на рецензію в ЕК	10 січня 2025 р.	виконано

Дата видачі завдання 25 листопада 2024 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Ситникова Ю. В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 66 с., 21 рис., 2 дод., 21 джерела.

АУДІОСИГНАЛ, ВЕЙВЛЕТ-ФІЛТРАЦІЯ, ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є, ФІЛЬТРУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – звукові сигнали, що містять фоновий шум, та підлягають обробці для покращення якості сигналу.

Мета роботи – проведення порівняльного аналізу методів спектрального аналізу та вейвлет-фільтрації звукових сигналів для видалення фонового шуму шляхом генерування тестових сигналів і додавання шуму за допомогою вбудованих бібліотек Python.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, моделювання та експериментальні дослідження для вивчення та порівняння методів фільтрації звукових сигналів.

У рамках даної роботи було проведено дослідження та порівняння методів фільтрації звукових сигналів для видалення фонових шумів. У роботі розглянуто два основних підходи до обробки звукових сигналів: метод швидкого перетворення Фур'є та вейвлет-фільтрація. Проведено аналіз їх теоретичних засад

Було розроблено програмний додаток, який реалізує два досліджуваних методи обробки звукових сигналів. Програмний засіб дозволяє користувачеві завантажувати аудіофайли, обирати метод фільтрації, налаштовувати параметри та аналізувати результати обробки за допомогою графічного інтерфейсу.

Результати експериментів показали, що метод ШПФ демонструє високу ефективність для фільтрації сигналів із чітко визначеними частотними компонентами шуму. Вейвлет-фільтрація виявилася більш придатною для обробки сигналів із нестационарним шумом, забезпечуючи кращу розбірливість голосових сигналів.

ABSTRACT

Introductory note: 66 pages, 21 figures, 2 appendixes, 21 sources.

AUIDOSIGNAL, FAST FOURIE TRANSFORM, FILTERING, WAVLET-FILTERING.

Object of research – sound signals containing background noise that are processed to improve signal quality.

Purpose of work – to conduct a comparative analysis of spectral analysis and wavelet filtering methods for sound signals to remove background noise by generating test signals and adding noise using Python's built-in libraries.

Methods of research – theoretical analysis, modeling, and experimental studies to explore and compare sound signal filtering methods.

As part of this work, a study and comparison of sound signal filtering methods for background noise removal were conducted. The study examined two main approaches to sound signal processing: the Fast Fourier Transform method and wavelet filtering. A theoretical analysis of their principles was carried out.

A software application was developed to implement the two investigated sound signal processing methods. The tool allows users to upload audio files, select a filtering method, adjust parameters, and analyze processing results through a graphical user interface.

The experimental results showed that the FFT method demonstrates high efficiency in filtering signals with well-defined frequency components of noise. Wavelet filtering proved to be more suitable for processing signals with non-stationary noise, ensuring better intelligibility of vocal signals.

ЗМІСТ

	С.
Перелік скорочень, умовних познач, одиниць і термінів	7
Вступ	8
1 Аналіз предметної області та постановка задач дослідження	10
1.1 Поняття звукового сигналу	10
1.2 Процес виникнення шуму та його фільтрація	12
1.3 Змістовна та формальна постановка задачі	14
1.4 Постановка задачі дослідження	15
2 Вибір та обґрунтування методу розв'язання	17
2.1 Методи фільтрації звукових сигналів	17
2.2 Метод фільтрації за допомогою перетворення Фур'є	18
2.3 Метод фільтрації звукових сигналів за допомогою вейвлетів	22
Висновки за розділом 2	26
3 Програмна реалізація	27
3.1 Мова програмування та середовище розробки	27
3.2 Архітектура програмного додатку	29
3.3 Огляд інтерфейсу програмного додатку	31
3.4 Фільтрація аудіофайлу за допомогою швидкого перетворення Фур'є	36
3.5 Фільтрація аудіофайлу за допомогою вейвлетів	37
Висновки за розділом 3	38
4 Результати обчислювального експерименту та їх аналіз.....	40
4.1 Фільтрація штучно згенерованого сигналу	40
4.2 Фільтрація голосового сигналу с накладеним білим шумом	44
Висновки за розділом 4	48
Висновки	49
Перелік джерел посилання	51
Додаток А Лістинг програми	53
Додаток Б Тези	66

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

ВП – Вейвлет-перетворення;

Гц – Герц;

дБ – Децибел;

ДПФ – Електроенцефалографія;

ДПФ – Дискретне перетворення Фур'є;

ЕКГ – Електрокардіографія;

ШПФ – Швидке перетворення Фур'є;

SNR – Signal-to-Noise Ratio;

SNR – Short-time objective intelligibility;

IDE – Integrated Development Environment.

ВСТУП

Актуальність теми. Широке застосування та поширення комунікаційних технологій у нинішній час, ставить перед розробниками задачу відокремлення корисного сигналу від шуму у багатьох сферах нашого життя. Різноманітні звукові перешкоди, такі як фоновий шум, акустичні резонанси чи небажані частотні компоненти, негативно впливають на якість сприйняття інформації та ускладнюють роботу зі звуковими сигналами. Це особливо важливо в умовах стрімкого розвитку технологій, які потребують точності та надійності під час роботи з аудіо, таких як телекомунікації, розпізнавання мовлення, кіноіндустрія, а також у медичних приладах і пристроях для поліпшення слуху.

У реальних умовах шуми можуть бути як стаціонарними (наприклад, постійний шум двигуна або вентилятора), так і нестаціонарними (наприклад, випадкові голоси, фоновий гамір). Це потребує застосування різноманітних методів фільтрації, які враховують особливості конкретних сигналів і шумів. Вибір ефективного методу обробки, здатного впоратися з такими викликами, є складним завданням, яке досліджується в цій роботі.

Актуальність дослідження підтверджується тим, що сучасні технології, орієнтовані на обробку звукових сигналів, мають на меті не лише видалення шуму, а й мінімізацію спотворення корисного сигналу. Зростає попит на розробку алгоритмів, які забезпечують високу якість очищення звуку з можливістю збереження всіх важливих характеристик сигналу, таких як структура мови, інтонація або частотний баланс у музичних композиціях.

Наукова значущість цієї роботи полягає у порівняльному аналізі різних методів фільтрації – швидкого перетворення Фур'є та вейвлет-фільтрації – які є актуальними і широко застосовуваними в обробці сигналів. Дослідження дозволяє зрозуміти переваги та обмеження кожного з методів, а також умови, за яких їх використання є найбільш ефективним.

Мета і завдання кваліфікаційної роботи. Метою кваліфікаційної роботи є проведення порівняльного аналізу методів спектрального аналізу та вей-

влет-фільтрації звукових сигналів для видалення фонового шуму шляхом генерування тестових сигналів і додавання шуму за допомогою вбудованих бібліотек Python. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

- аналітичний огляд методів та засобів обробки звукових сигналів;
- застосування спектрального аналізу та вейвлет-фільтрації для видалення фонових шумів;
- розробка програмного забезпечення для аналізу та видалення фонових шумів;
- експериментальне порівняння методів спектрального аналізу та вейвлет-фільтрації.

Об'єктом дослідження є звукові сигнали, що містять фоновий шум, та підлягають обробці для покращення якості сигналу.

Предметом дослідження є методи фільтрації звукових сигналів, такі як спектральна фільтрація та вейвлет-фільтрація, а також їхня ефективність у видаленні різних видів фонових шумів.

Методи дослідження. У роботі використовуються теоретичний аналіз, моделювання та експериментальні дослідження для вивчення та порівняння методів фільтрації звукових сигналів. Це дозволяє обґрунтувати вибір оптимального методу та покращити якість обробки звуку в різних умовах.

Публікації. Результати, отримані у кваліфікаційній роботі, було представлено на 3-му Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції “НАВЧАННЯ І ВИКЛАДАННЯ: у світі після війни” (м. Харків, 8 листопада 2024 р.) [1].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Поняття звукового сигналу

Звук є фізичним явищем, що виникає в результаті коливань частинок середовища, які передаються у вигляді хвиль від джерела до приймача. Він поширюється у пружних середовищах, таких як повітря, вода або тверді тіла, у вигляді подовжніх хвиль, де частинки середовища рухаються в напрямку поширення хвилі. На фізичному рівні звук описується змінами тиску, що можуть бути зареєстровані як коливання звукового сигналу. Для людини звук є важливим засобом комунікації та сприйняття навколишнього середовища.

Основними характеристиками звуку є частота, амплітуда та фаза. Частота вимірюється в герцах (Гц) і визначає висоту звуку: чим вища частота, тим вищий звук. Людське вухо сприймає звуки в діапазоні від 20 Гц до 20 кГц. Амплітуда відображає інтенсивність звуку, яка визначає його гучність. Зміна амплітуди сигналу викликає суб'єктивне відчуття голосності, що вимірюється в децибелах (дБ). Фаза описує зсув коливань відносно початкової точки та важлива для відтворення просторових характеристик звуку, наприклад, при стереофонічному звучанні [2]. На рис. 1.1 зображено приклад характеристики коливань звуку [3].

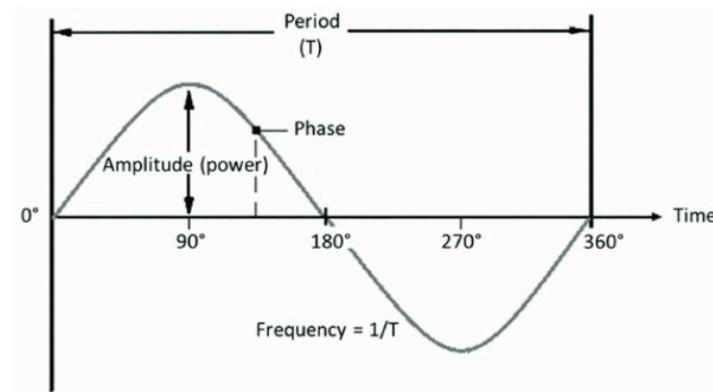


Рисунок 1.1 – Графічний приклад характеристик звуку

Звукові сигнали поділяються на два основні види: гармонічні та негармонічні. Гармонічні сигнали мають регулярну структуру і можуть бути описані синусоїдальними функціями. До таких звуків належить більшість музичних тонів. Приклад гармонічного звукового сигналу наведено на рис. 1.2.

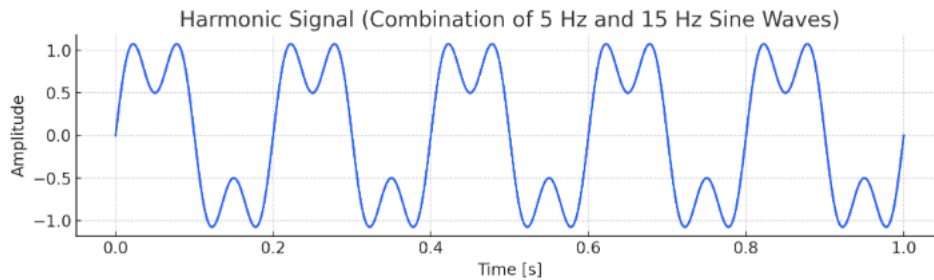


Рисунок 1.2 – Графічний приклад гармонічного звукового сигналу

Негармонічні сигнали, такі як шум, не мають регулярної структури і характеризуються випадковим розподілом частотних компонентів. У реальному житті звуки часто складаються з комбінацій гармонічних та негармонічних елементів. Приклад негармонічного звукового сигналу наведено на рис. 1.3.

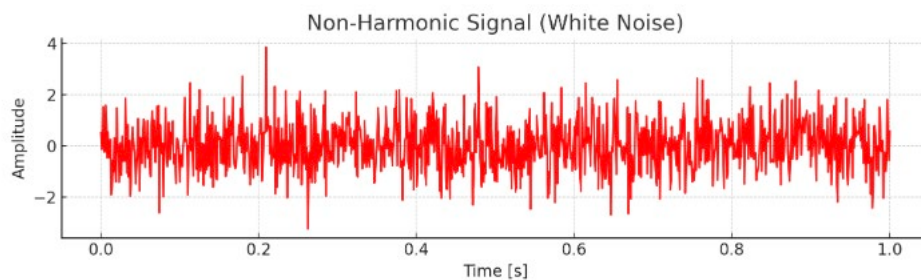


Рисунок 1.3 – Графічний приклад негармонічного сигналу

Залежно від джерела виникнення, звук може мати природне або штучне походження. Природні звуки – це голоси тварин, шум води або вітру, тоді як штучні звуки створюються за допомогою музичних інструментів, електронних пристроїв або мовлення. Звуки також можуть нести різноманітну інформацію, тому їх фільтрація та обробка є важливою задачею у багатьох сферах: від обробки мовлення в системах зв'язку до аудіоаналізу в музичній індустрії.

1.2 Процес виникнення шуму та його фільтрація

Шум у звукових сигналах виникає як небажаний компонент, що спотворює основний корисний сигнал і знижує його якість. Джерела шуму можуть бути різноманітними, а сам процес його виникнення залежить від зовнішніх умов, середовища передачі та технічних обмежень апаратури. Шум може з'являтися під час запису звуку, його передачі каналами зв'язку або в процесі відтворення, що створює потребу у фільтрації для збереження корисної інформації.

Наведений нижче приклад (рис 1.4) демонструє отриманий сигнал (синій) із шумом та основним сигналом без шуму (червоний) [4].

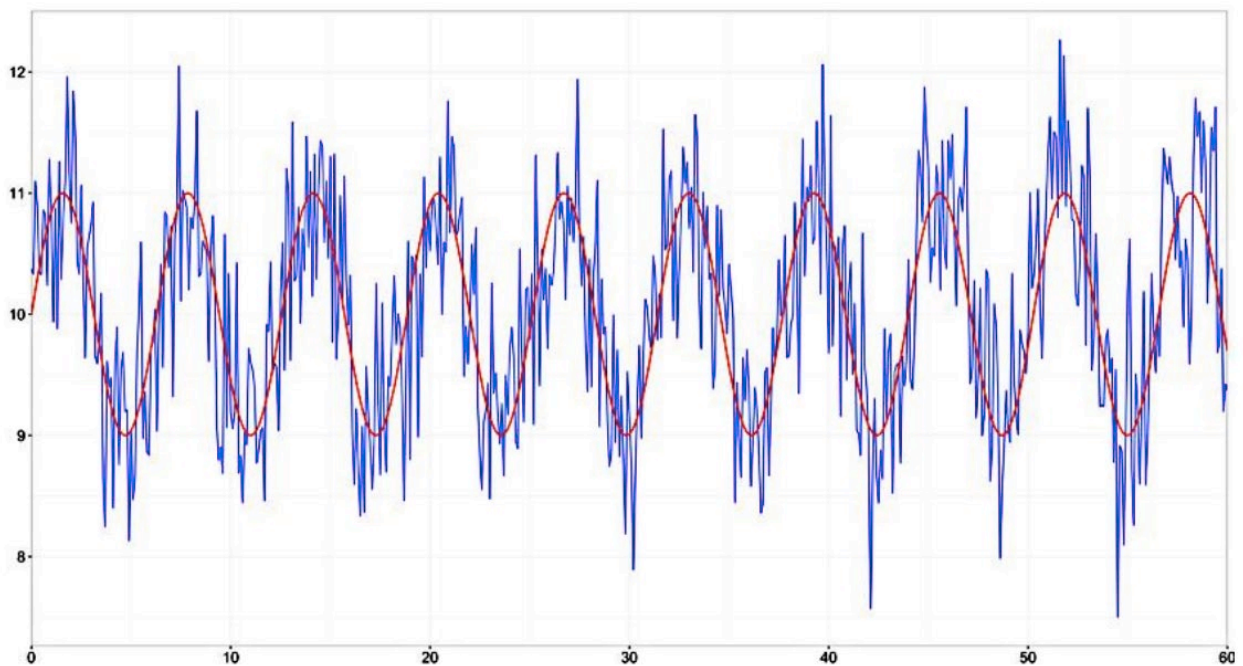


Рисунок 1.4 – Приклад зашумленого сигналу

Класифікація шумів включає кілька основних типів. Білий шум характеризується рівномірним розподілом енергії на всіх частотах і є випадковим за природою. Він може виникати через теплові коливання електронних компонентів. Рожевий шум має зменшення інтенсивності з ростом частоти й зазвичай зу-

стрічається в природних явищах. Інші типи шуму, такі як імпульсний та низькочастотний шум, виникають через короточасні перешкоди або специфіку апаратури. У реальних умовах шум часто має змішану структуру, що ускладнює процес його обробки.

Фільтрація шуму є одним з ключових завдань у звуковій інженерії. Мета фільтрації полягає у видаленні або зниженні рівня шумів, зберігаючи при цьому корисний сигнал максимально незмінним. В той же час, фільтрація шуму в аудіосигналах є складними завданнями, що охоплюють кілька етапів: аналіз сигналу, ідентифікацію шумових компонентів і застосування алгоритмів для їхнього зменшення або видалення. Шум може спотворювати корисний сигнал і знижувати його якість, тому коректне розпізнавання шумів та їх усунення має велике значення в таких сферах, як звукозапис, телекомунікації та розпізнавання мовлення [5].

Для успішного видалення шуму потрібно спочатку визначити його характеристики. У процесі аналізу аудіосигналу здійснюється пошук відмінностей між корисною інформацією та фоновими перешкодами.

Основними характеристиками шуму є:

- спектральні характеристики: шум розподіляється по різних частотах, наприклад, білий шум має рівномірний спектр, а низькочастотний шум сконцентрований у нижньому діапазоні частот;
- тимчасова структура: шум може бути стаціонарним (постійна інтенсивність) або нестаціонарним (змінюється з часом);
- ставлення сигнал/шум визначає, наскільки сильно корисний сигнал перекривається шумом.

Основними інструментами для аналізу є швидке перетворення Фур'є (ШПФ) та вейвлет-фільтрація. Перетворення Фур'є дозволяє відокремити частотні компоненти сигналу, тоді як вейвлети дають можливість аналізувати як частотні, так і часові властивості сигналу, що є особливо корисним для нестаціонарних шумів.

Спектральна фільтрація – це метод, який полягає у перетворенні сигналу

у частотну область за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Після цього небажані частотні компоненти, які відповідають шуму, видаляються або приглушуються. Спектральна фільтрація ефективна для видалення шумів із чітко визначеними частотами, таких як гул або фонова музика. Однак для динамічних і складних шумів цей метод може бути менш ефективним. Також можлива втрата частини корисного сигналу, якщо його частоти накладаються на шумові компоненти.

Вейвлет-фільтрація дозволяє обробляти сигнал на різних рівнях роздільності як у часі, так і у частоті. Цей метод особливо корисний для обробки короточасних або імпульсних шумів. Сутність його полягає у застосуванні порогової обробки коефіцієнтів вейвлет-розкладу: значення, що відповідають шуму, зменшуються або обнуляються, тоді як коефіцієнти корисного сигналу зберігаються. Недоліком цього методу є висока обчислювальна складність.

Незважаючи на ефективність сучасних методів фільтрації, існують певні виклики. Наприклад, деякі види шумів перекриваються з частотами корисного сигналу, що ускладнює їхнє видалення без втрат. Важливим є також баланс між рівнем зменшення шуму та збереженням природного звучання обробленого сигналу.

1.3 Змістовна та формальна постановка задачі

Метою цього дослідження є аналіз та порівняння методів фільтрації звукових сигналів для видалення фонових шумів із застосуванням сучасних алгоритмів обробки сигналів. Задача полягає у вивченні принципів роботи та ефективності різних підходів, таких як спектральна та вейвлет-фільтрація, їх можливостей у зниженні шуму та збереженні корисної інформації. Дослідження охоплює не лише теоретичний аналіз існуючих методів, але й практичну реалізацію фільтрації з метою визначення оптимальних рішень для різних типів звукових сигналів і шумів.

Основними етапами дослідження є:

- оцінка переваг та недоліків кожного з методів на основі експериментальних даних;
- використання сучасних програмних інструментів для реалізації та тестування алгоритмів фільтрації.

Об'єктом дослідження є звукові сигнали, що містять фоновий шум. Такі сигнали можуть виникати в різних ситуаціях, наприклад, під час запису мовлення, музичних виконань, у телекомунікаційних системах або медичних застосуваннях. Звукові сигнали відрізняються за своєю природою, характеристиками і спектральним складом, що ускладнює їх обробку.

Предметом дослідження є методи фільтрації звукових сигналів для видалення фонних шумів. Зокрема, дослідження охоплює спектральну фільтрацію, вейвлет-фільтрацію, адаптивні методи, а також комбіновані підходи. Метою є визначення найефективніших методів для покращення якості звуку залежно від характеристик сигналу та типу шуму.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести аналіз предметної області та постановка задач дослідження;
- зробити вибір та обґрунтувати метод розв'язання;
- розробити програмне забезпечення для аналізу та видалення фонних шумів;
- зробити експериментальне порівняння методів спектрального аналізу та вейвлет-фільтрації для знешумлення звукового сигналу.

1.4 Постановка задачі дослідження

У рамках дипломної роботи, яка присвячена дослідженню та порівнянню різних методів фільтрації звукових сигналів для видалення фонних шумів, необхідно розглянути кілька важливих аспектів.

Важливо проаналізувати існуючі методи фільтрації, оцінити їх переваги

та недоліки, а також визначити їхню ефективність у видаленні фонових шумів у різних умовах. Експериментальне дослідження також відіграє ключову роль, оскільки дозволить протестувати різні методи на реальних звукових сигналах з фоновим шумом, що дасть змогу оцінити їх результати.

Після проведення експериментів необхідно здійснити порівняння отриманих результатів, аналізуючи якість звуку, зменшення шуму та збереження корисної інформації. Завершити дослідження планується розробкою рекомендацій щодо вибору оптимальних методів фільтрації звукових сигналів в залежності від конкретних умов.

2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗВ'ЯЗАННЯ

2.1 Методи фільтрації звукових сигналів

Методи фільтрації звукових сигналів забезпечують можливість покращення якості звуку шляхом зменшення впливу фонових шумів. Вони базуються на різних підходах, які дозволяють розділити корисні та небажані компоненти сигналу. Вибір оптимального методу фільтрації залежить від типу шуму, властивостей звукового сигналу та умов, у яких відбувається його обробка [6].

Одним із основних методів фільтрації звукових сигналів є спектральна фільтрація, яка працює з частотними характеристиками сигналу. Цей підхід передбачає перетворення звукового сигналу з часової області у частотну за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Після цього аналізують спектр сигналу, де ідентифікують частоти, які відповідають шуму. Наприклад, низькочастотний шум або постійні високочастотні компоненти, що заважають прослуховуванню, можна легко відокремити у частотній області. Встановлюється частотний поріг, який дозволяє відсікати небажані частоти, а потім відфільтрований сигнал відновлюється з частотної області назад у часову. Цей метод ефективний для обробки стаціонарних шумів, які мають стабільну частотну характеристику, таких як шум від обладнання або фонові шуми в приміщеннях. Проте при обробці динамічних, нестаціонарних шумів він може бути обмеженим, оскільки такі шуми змінюються у часі.

Ще один важливий метод – вейвлет-фільтрація, яка дозволяє працювати з сигналом як у часовій, так і в частотній області. На відміну від перетворення Фур'є, яке не локалізує компоненту у часі, вейвлет-фільтрація виконує розклад сигналу на різні рівні, де кожен рівень відповідає певному діапазону частот і тривалості. Використання вейвлетів дає можливість ідентифікувати короткочасні або імпульсні перешкоди, що є корисним для обробки нестаціонарних сигналів. Процес вейвлет-фільтрації включає розклад сигналу на кілька рівнів за допомогою вибраного вейвлета, що дозволяє детально досліджувати структуру

звукових даних. Після цього застосовується порогова обробка коефіцієнтів, щоб зменшити значення тих компонентів, які відповідають шуму, та зберегти основний сигнал. Зворотне перетворення відновлює сигнал, у якому вплив шуму значно зменшений. Вейвлет-фільтрація є ефективною для роботи з сигналами, що містять короткочасні шумові перешкоди, і особливо добре підходить для очищення записів мови та музики.

Крім окремих методів фільтрації, важливим є комбінування різних підходів для досягнення оптимального результату. Наприклад, комбінована фільтрація, яка об'єднує спектральний та вейвлет-аналіз, дозволяє одночасно видаляти як стаціонарні, так і нестаціонарні компоненти шуму. Застосування декількох фільтрів часто є виправданим, оскільки кожен з них має свої сильні та слабкі сторони. Комбіновані підходи надають більше можливостей для гнучкого налаштування параметрів обробки, що робить їх ефективними для роботи з різними типами шумів.

Таким чином, методи фільтрації звукових сигналів охоплюють широкий спектр підходів, кожен з яких має свої переваги залежно від типу та природи шуму. Спектральна фільтрація ефективна для видалення постійних шумів, вейвлет-фільтрація є гнучкою та дозволяє зменшувати імпульсні перешкоди, а адаптивна фільтрація підходить для динамічних середовищ. Використання комбінованих підходів забезпечує більш гнучке рішення, дозволяючи об'єднувати можливості різних методів та досягати високої якості звуку навіть у складних умовах обробки.

2.2 Метод фільтрації за допомогою перетворення Фур'є

Метод швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) є одним із найважливіших алгоритмів у сучасній цифровій обробці сигналів. Він значно прискорює розрахунок дискретного перетворення Фур'є (ДПФ), яке використовується для аналізу спектру сигналів. Історія розвитку ШПФ бере початок ще в далекому минулому, але ключові етапи та прориви пов'язані із роботою кількох вчених.

Перетворення Фур'є було запропоновано ще на початку 19 століття Жаном-Батистом Фур'є, який досліджував способи представлення періодичних функцій у вигляді рядів гармонік. Проте, у чисельному вигляді обчислення цих перетворень для великої кількості точок було надзвичайно складним. Стандартний алгоритм ДПФ має обчислювальну складність $O(N^2)$, що ускладнювало його використання для обробки великих обсягів даних.

Ще в середині 19 століття Карл Фрідріх Гаусс запропонував ідею оптимізації обчислень для задач астрономії, що була схожа на сучасний алгоритм ШПФ. Однак його робота залишалася маловідомою та не отримала належного поширення.

Справжній прорив стався в 1965 році, коли Джеймс Кулі та Джон Такі запропонували алгоритм, який значно прискорював обчислення ДПФ. Їх алгоритм використовував ідею рекурсивного розбиття обчислень на менші підзадачі та мав обчислювальну складність $O(N \log N)$. Саме ця робота зробила ШПФ основним інструментом для аналізу спектрів у багатьох галузях, включаючи обробку звуку, зображень та радіосигналів.

Після публікації роботи Кулі та Такі ШПФ швидко набула популярності. Вона стала основою для багатьох цифрових систем і активно використовувалася в телекомунікаціях, медичній діагностиці, радіолокації та аудіо обробці. У наступні десятиліття з'явилися різні модифікації ШПФ, які оптимізували обчислення для спеціалізованих пристроїв і паралельних систем.

На даний момент Метод фільтрації звукового сигналу на основі перетворення Фур'є (ШПФ) є одним із найпоширеніших підходів в обробці сигналів. Він дозволяє перейти від аналізу сигналу в часовій області до частотної області, що дає можливість легко визначити й приглушити частотні компоненти, які відповідають шумам [7].

Перетворення Фур'є дозволяє представити сигнал як суму синусоїдальних компонент різної частоти, амплітуди та фази. Для неперервного сигналу $x(t)$ у часовій області перетворення Фур'є задається формулою (2.1):

$$x(f) = \int x(t)e^{-2j\pi ft} dt \quad (2.1)$$

де $X(f)$ – спектр сигналу в частотній області;

$x(t)$ – сигнал у часовій області;

f – частота;

j – уявна одиниця ($j^2 = -1$).

Проте для цифрових сигналів застосовується дискретне перетворення Фур'є (ДПФ), оскільки аудіосигнали зазвичай мають дискретну форму. ДПФ задається формулою (2.2):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.2)$$

де $X(k)$ – спектральний коефіцієнт на частоті k ;

$x(n)$ – значення сигналу на n -му індексу у часовій області;

N – загальна кількість відліків сигналу, де відлік – чисельне значення амплітуди сигналу у певний момент часу.

Процес фільтрації сигналу за допомогою ШПФ відбувається у декілька кроків. Спочатку вхідний сигнал $x(n)$ проходить перетворення Фур'є (ШПФ). Це дає змогу отримати спектр сигналу $X(k)$, який містить інформацію про всі частоти, що присутні в сигналі. Після отримання спектру визначаються частоти, які відповідають шуму. Це можуть бути, наприклад, низькочастотні або високочастотні компоненти, залежно від природи шуму (фонова вібрація, тощо). Після отримання спектру визначаються частоти, які відповідають шуму. На цьому етапі небажані частотні компоненти або приглушуються, або повністю обнуляються. Це можна описати фільтром, який у частотній області має передавальну функцію $H(k)$. Фільтр застосовується до спектру за формулою (2.3):

$$Y(k) = X(k)H(k), \quad (2.3)$$

де $Y(k)$ – відфільтрований спектр сигналу.

Після фільтрації спектру застосовується зворотне швидке перетворення Фур'є (ЗШПФ) для перетворення сигналу назад у часову область за формулою (2.4):

$$y(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) e^{j \frac{2\pi}{N} kn}. \quad (2.4)$$

Отриманий сигнал $y(n)$ є очищеним від шуму початковим сигналом.

Метод фільтрації за допомогою ШПФ має низку переваг. Він дозволяє ефективно відокремлювати стаціонарні шуми з відомими частотами, такі як електромагнітні перешкоди або вібрації. Крім того, цей метод легко реалізується за допомогою стандартних бібліотек і є швидким завдяки ШПФ алгоритму. Головним недоліком є те, що він менш ефективний для нестационарних шумів, оскільки не враховує зміну частотних характеристик з часом. Це може призвести до часткової втрати корисного сигналу при фільтрації складних аудіосигналів [9].

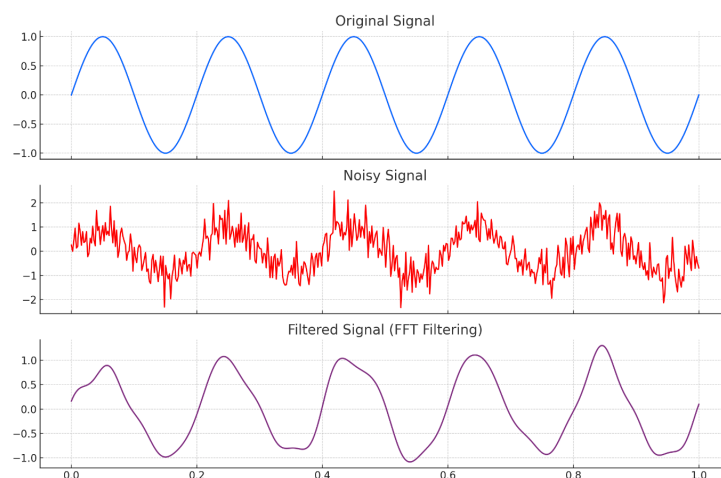


Рисунок 2.1 – Приклад роботи ШПФ для зашумленого сигналу

Приклад роботи ШПФ для аудіосигналу до якого було додано білий шум приведено на рис. 2.1.

2.3 Метод фільтрації звукових сигналів за допомогою вейвлетів

Історія вейвлет-фільтрації бере початок у розробці математичних методів аналізу сигналів, що надають можливість виявляти локальні особливості сигналу. Якщо перетворення Фур'є (ШПФ) добре підходить для аналізу стаціонарних сигналів, то воно має обмеження в обробці сигналів, які змінюються у часі. Саме це підштовхнуло до пошуку нових інструментів, і вейвлети стали таким розширенням, знайшовши своє застосування у фільтрації аудіо.

Основи вейвлет-аналізу сформувалися в математиці на початку 20 століття у зв'язку з дослідженнями Жана Морле, який використовував модифіковані гармонічні функції для геофізичних досліджень. Ідеї Морле отримали подальший розвиток у роботах математика Інгрід Добеші, яка запропонувала вейвлети з компактною підтримкою. Ці вейвлети були особливо корисними для цифрової обробки сигналів, оскільки дозволяли ефективно аналізувати локальні зміни в сигналі.

Поява цифрових технологій у 80-х роках ХХ століття викликала інтерес до нових методів аналізу сигналів. Вейвлети дозволили виконувати масштабний аналіз: поділ сигналу на декілька рівнів роздільності (деталізації), що стало корисним у таких галузях, як обробка аудіо, відео та зображень. На відміну від перетворення Фур'є, вейвлет-фільтрація може виявляти особливості короткочасних шумів та змін у сигналі, що зробило її дуже ефективною для зменшення фонових шумів в аудіо.

На початку 90-х років вейвлет-аналіз почав активно застосовуватися у фільтрації звукових сигналів. Однією з важливих ідей стало використання порогового обнулення коефіцієнтів у вейвлет-доміні, запропоноване Давідом Донохо. Цей метод передбачав видалення вейвлет-коефіцієнтів, які відповідають

фоновим шумам, що дозволяло залишити лише корисний сигнал. Такий підхід виявився особливо ефективним для видалення білого шуму, імпульсних перешкод та інших небажаних звукових артефактів.

Сьогодні вейвлет-фільтрація широко застосовується не лише для очищення аудіо від шумів, але й для стискання звукових даних, виділення важливих компонентів та створення аудіоефектів. Вона активно використовується в медичній діагностиці (наприклад, для аналізу ЕКГ та ЕЕГ), аудіотехнологіях (очищення записів), та навіть у технологіях розпізнавання голосу. Розвиток алгоритмів машинного навчання та глибоких нейронних мереж інтегрується з вейвлет-аналізом, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності фільтрації [10].

Вейвлет – це хвильова функція з нульовим середнім значенням (СЗ), що є обмеженою у часовому та частотному поданнях. На відміну від швидкого перетворення Фур’є, що ґрунтується на розкладанні сигналу в базисі ортогональних гармонічних функцій необмеженої тривалості, які є плавними та передбачуваними, вейвлет-перетворення (ВП) використовує нерегулярні та загалом несиметричні хвильові функції.

Неперервне ВП визначається як згортка сигналу $x(t)$, що аналізується, та деякої вейвлет-функції $\Psi_{a,b}$, яку отримують шляхом розтягу-стиску (масштабування) та часового зсуву базової хвильової функції за формулою (2.5):

$$W_{\Psi}x(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.5)$$

де a – показник масштабу, зменшення якого визначає стиснення вейвлет-функції, а збільшення – розтяг вейвлет-функції;

b – показник зсуву базової вейвлет-функції за часовою віссю;

* – знак комплексного спряження.

Параметри a та b визначають відповідно масштаб та положення вейвлета

на часовій осі, причому за малих значень a проводиться аналіз високочастотних складових сигналу $x(t)$, а за великих значень – низькочастотних складових. В результаті перетворення (2.1) зі змінними a та b визначаються вейвлет коефіцієнти, які є функціями параметрів масштабу та положення, так як вони характеризуються різними масштабами на різних частинах сигналу $x(t)$.

Дискретне ВП визначається для параметрів масштабу та зсуву з основою 2, тобто для $a = 2^j$ та $b = n2^j$, за наступною формулою (2.6):

$$W(2^j, n2^j) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum_k \Psi^* \left(\frac{k}{2^j} - n \right) x(k), \quad (2.6)$$

де j – номер рівня розкладання, який визначає протяжність базового вейвлету на часовій осі.

В процесі перетворення відбувається розкладання сигналу, що аналізується, в ієрархічний набір апроксимацій, які отримані для великих значень параметру масштабу та характеризують повільні змінювання сигналу, та деталей d_j , що отримані для малих значень параметру масштабу та характеризують високочастотні складові сигналу [9].

Таким чином, вимірюваний сигнал $x(t)$ в результаті ВП набуває подання у вигляді такої суми, згідно формули (2.7):

$$x(t) = x_{j_m}^a(t) + \sum_{j=1}^{j_m} x_j^d(t), \quad (2.7)$$

де j_m визначає рівень розподілу з найбільш грубим часовим розділенням, а перехід до апроксимації на попередньому рівні (j_{m-1}) відбувається шляхом додавання функцій апроксимацій та деталей на рівні j_m .

Для реалізації розкладання (2.3) використовуються дзеркальні квадратурні фільтри, коефіцієнти яких пов'язані між собою такою залежністю (2.8):

$$g_k = (-1)^k h_{1-k} \quad (2.8)$$

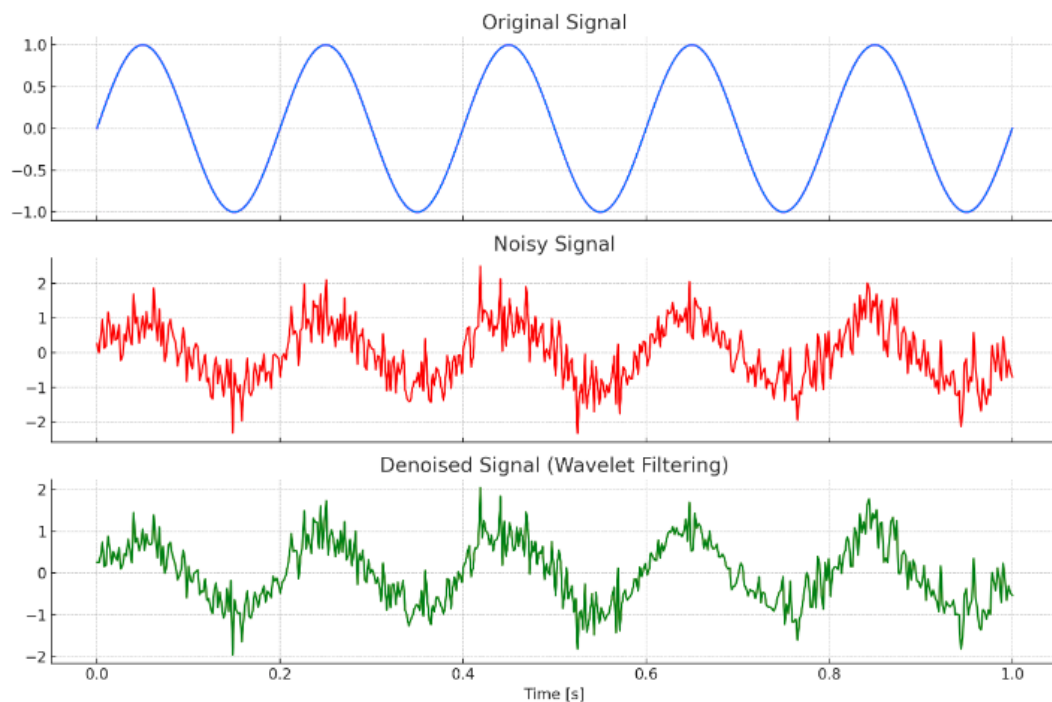
і за якими визначаються спочатку масштабна функція $\varphi(t)$, а потім вейвлет $\psi(t)$ у відповідності до масштабних залежностей (2.9) та (2.10):

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \varphi(2t - k), \quad (2.9)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \varphi(2t - k). \quad (2.10)$$

Застосування описаної процедури до різних значень M для масштабних функцій породжує сімейство вейвлетів Добеші, які позначаються як dbM , де M відповідає кількості рівних нулю моментів вейвлету і визначає його порядок.

Графічний приклад роботи вейвлет-перетворення для чистого сигналу на який було накладено білий шум наведено на рис. 2.2.



Риснуок 2.2 – Приклад роботи вейвлет-перетворення
для зашумленого сигналу

Висновки до розділу 2

В розділі було розглянуто два провідні підходи до фільтрації звукових сигналів – ШПФ та вейвлет-фільтрацію. Аналіз теоретичних засад кожного з методів підтвердив, що обидва вони є актуальними та широко застосовуваними в сучасній цифровій обробці сигналів.

Використання ШПФ ефективно для роботи з сигналами, які містять стаціонарні шуми або мають вузькі частотні компоненти, що заважають основному сигналу. Такий підхід забезпечує чітке відсікання небажаних частот завдяки переходу в частотну область і подальшому зворотному перетворенню. Водночас ШПФ має певні обмеження в ситуаціях, коли шум або корисний сигнал є нестационарними й змінюються з часом.

Метод вейвлет-фільтрації, на відміну від ШПФ, пропонує часово-частотний аналіз завдяки розкладу сигналу на вейвлет-коефіцієнти. Це дозволяє більш гнучко обробляти імпульсні або короткочасні шуми і, загалом, краще зберігає локальні особливості сигналу. Однак точність результатів залежить від вибору типу вейвлету, рівня декомпозиції та порогової обробки, і це може потребувати додаткових налаштувань для конкретних задач.

Таким чином, розглянуті методи доповнюють один одного та демонструють різні переваги залежно від типу сигналу і природи шуму. ШПФ підходить для сигналів із чітко визначеними частотними компонентами шуму, тоді як вейвлет-фільтрація стає більш актуальною за наявності нестационарних, імпульсних або широкосмугових перешкод. Отримані висновки слугуватимуть підґрунтям для подальших експериментальних досліджень у наступних розділах і дозволять обрати оптимальний метод фільтрації залежно від умов застосування.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

3.1 Мова програмування та середовище розробки

Для реалізації методів, які були розглянуті у розділі 2, необхідно розробити програмний продукт для фільтрації аудіосигналу за допомогою швидкого перетворення Фур'є та вейвлет-фільтрації. Додаток має підтримувати завантаження аудіосигналу, виконувати фільтрацію із використанням конкретного методу, надавати можливість користувачеві здійснювати візуалізацію сигналу до та після обробки, а також зберігати результат виконаної обробки в новий файл.

Від вибору мови програмування та середовища розробки залежить зручність розробки, ефективність реалізації та точність результатів. Для розробки, тестування та аналізу методів в даній роботі використовувалася мова програмування Python [11] та середовище розробки PyCharm [12].

Дана мова була створена у 1991 році Гвідо ван Россумом, який є голландським програмістом. Однією з основних ідей було створення простої, зрозумілої та гнучкої синтаксичної структури для розробки, яка б дозволяла розробникам писати код, який легко читати. Слово Python було вибрано не через змію, а через улюблене шоу розробника – Monty Python's Flying Circus. Мова програмування пристосована для вивчення, тому вона активно використовується і в освітніх цілях.

З часом Python еволюціонував і став універсальною мовою програмування з величезною кількістю бібліотек для обробки даних, машинного навчання, веб-розробки та роботи із сигналами. Завдяки таким бібліотекам, як NumPy, SciPy, Matplotlib, Librosa та PyWavelets, Python отримав широке застосування в обробці звукових сигналів. Крім того, Python підтримує інтеграцію з іншими мовами, такими як C та Java, що робить його особливо привабливим для наукових та інженерних задач.

Для роботи з Python було обрано інтегроване середовище розробки (IDE) PyCharm, створене компанією JetBrains. PyCharm є одним із найпотужніших і

найзручніших інструментів для програмування на Python завдяки своєму багатofункціональному інтерфейсу та широкому набору інструментів. Ілюстративне зображення додатку Pycharm зображено на рисунку 3.1.

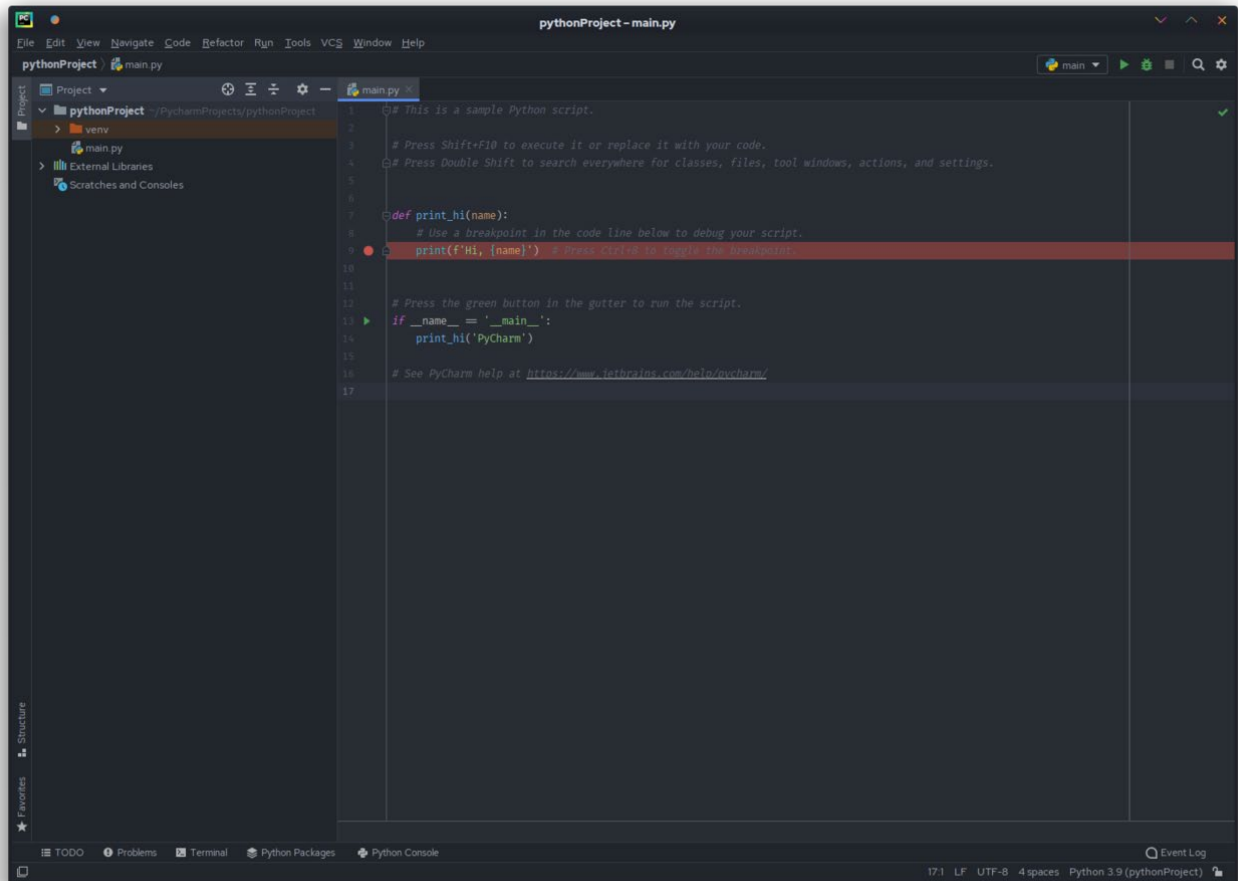


Рисунок 3.1 – Головне вікно середовища розробки PyCharm

PyCharm підтримує автодоповнення коду, рефакторинг, інтеграцію з системами контролю версій (наприклад, Git) і дозволяє легко управляти залежностями через вбудовані менеджери пакетів. Важливим є також те, що PyCharm має інструменти для налагодження, які дозволяють зручно аналізувати помилки та тестувати код у реальному часі. Це значно спрощує розробку та забезпечує ефективність під час реалізації складних алгоритмів фільтрації звукових сигналів.

У роботі Python використовувався для розробки алгоритмів спектральної та вейвлет-фільтрації звукових сигналів. Бібліотеки, такі як NumPy та SciPy, за-

безпечували ефективну обробку даних і виконання чисельних обчислень, тоді як PyWavelets дозволив реалізувати вейвлет-аналіз. Для візуалізації сигналів до і після фільтрації застосовувалася бібліотека Matplotlib, що дозволило оцінити ефективність розроблених методів.

PyCharm забезпечив інтерактивний процес розробки, дозволивши структурувати проєкт, тестувати код і документувати його з використанням вбудованих функцій IDE. Це середовище також дозволило інтегрувати сторонні модулі для додаткових функцій, таких як автоматичне форматування коду чи робота з великими масивами даних.

Таким чином, використання Python у середовищі PyCharm у поєднанні з широким набором бібліотек надало потужний інструментарій для розробки, тестування та аналізу методів фільтрації звукових сигналів. Це дозволило забезпечити гнучкість, зручність та точність під час виконання задачі.

3.2 Архітектура програмного додатку

Архітектура програмного додатку для фільтрації аудіосигналу визначає його структурні елементи, ключові модулі та їхню взаємодію. Специфікація модулів визначає вхідні, вихідні дані та умови виконання. Основна мета архітектури полягає у зручності користування, гнучкій роботі та ефективності реалізації методів обробки звукових сигналів, швидке перетворення Фур'є та вейвлет-фільтрація з використанням бібліотеки Tkinter [13] для графічного інтерфейсу.

Додаток побудовано за допомогою декількох ключових модулів, кожен із яких виконує свою специфічну функцію. Графічний інтерфейс користувача, розроблений за допомогою бібліотеки Tkinter, забезпечує зручну взаємодію користувача з додатком. Він дозволяє завантажувати аудіофайли, обирати метод фільтрації, налаштовувати параметри обробки сигналу, запускати фільтрацію та переглядати результати.

Модуль роботи з файлами займається завантаженням аудіофайлів та збереженням оброблених сигналів. Крім того, він виконує попередній аналіз файлу, визначаючи частоту дискретизації, тривалість і інші характеристики звукового запису.

Модуль візуалізації, створений за допомогою бібліотеки Matplotlib, буде графіки для сигналів до та після обробки. Matplotlib і Tkinter інтегровані, щоб графіки показувалися приховано у вікні програми.

Потік даних у програмі зображено у форматі блок схемі на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Блок-схема потоку даних у додатку

3.3 Огляд інтерфейсу програмного додатку

Інтерфейс додатку забезпечує зручний доступ до функцій фільтрації аудіофайлів. У верхній частині розташована кнопка «Choose file», яка дозволяє завантажити WAV-файл [14] для обробки. Після вибору файлу відображаються його назва та розмір, що дає змогу користувачу перевірити завантажений файл. Головне вікно додатку зображено на рисунку 3.3.

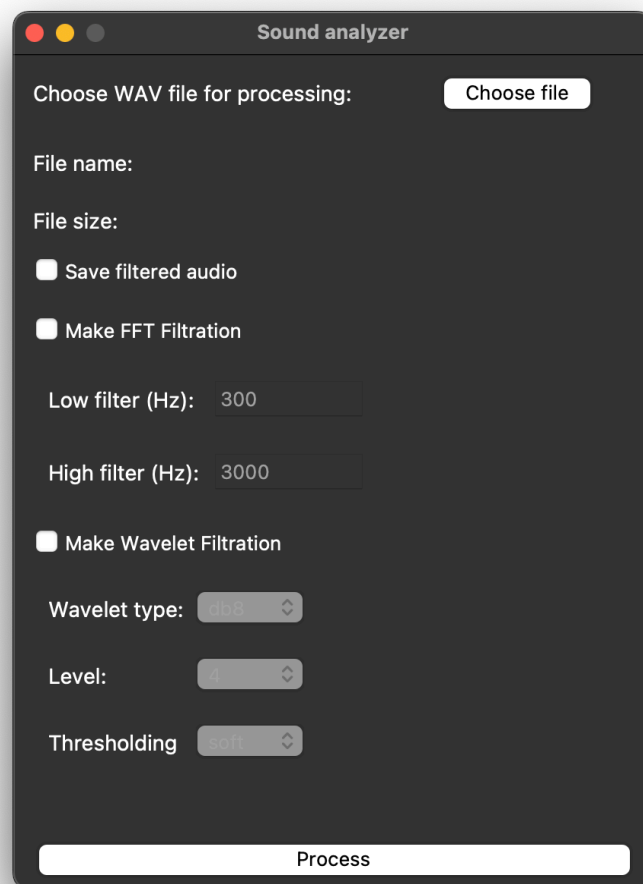


Рисунок 3.3 – Головне вікно додатку

Програма пропонує два основні методи фільтрації: швидке перетворення Фур'є і вейвлет-фільтрація. Для ШПФ користувач може налаштувати частотні межі фільтрації, вказавши низькочастотний і високочастотний пороги. Приклад

режиму роботи фільтрації за допомогою швидкого перетворення Фур'є зображено на рисунку 3.4.

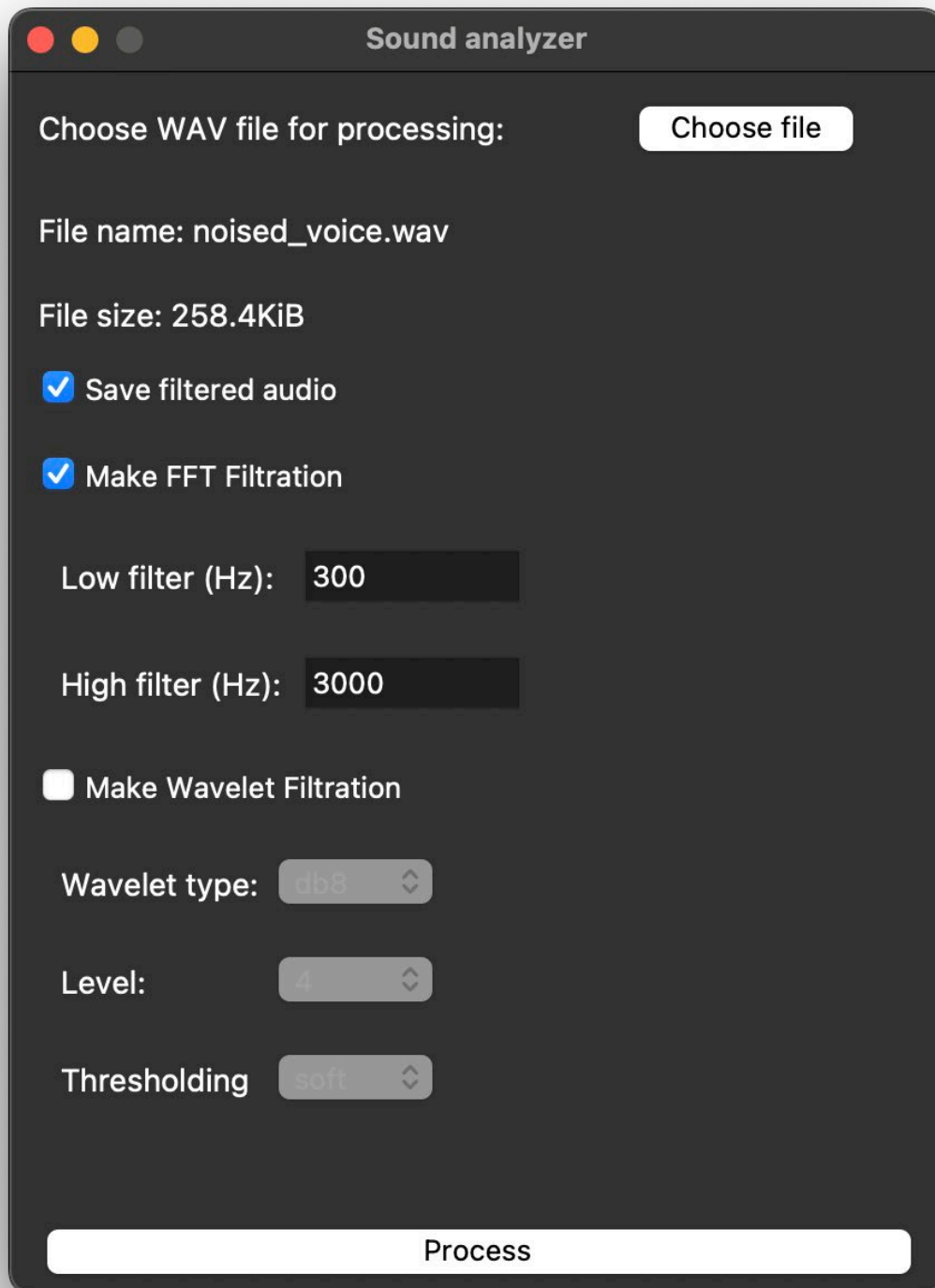


Рисунок 3.4 – Налаштування додатку для фільтрації за допомогою ШПФ

Для вейвлет-фільтрації доступні вибір типу вейвлету, рівня декомпозиції та методу порогової обробки. Приклад режиму роботи фільтрації за допомогою швидкого перетворення Фур'є зображено на рисунку 3.5.

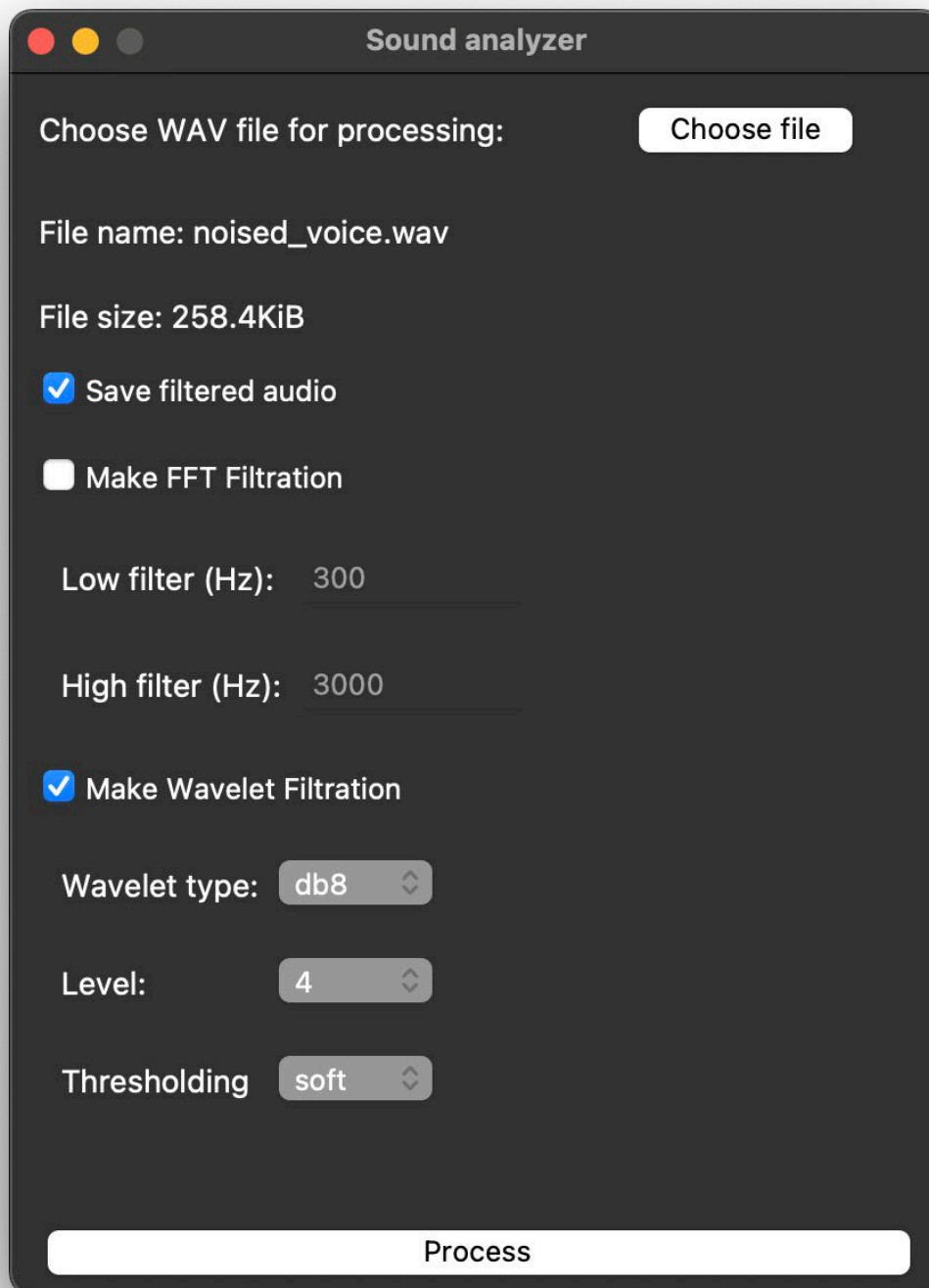


Рисунок 3.5 – Налаштування фільтрації за допомогою вейвлетів

Обидва методи активуються за допомогою відповідних прапорців. Приклад режиму роботи додатку в режимі вейвлет-фільтрації та швидкого перетворення Фур'є зображено на рисунку 3.6.

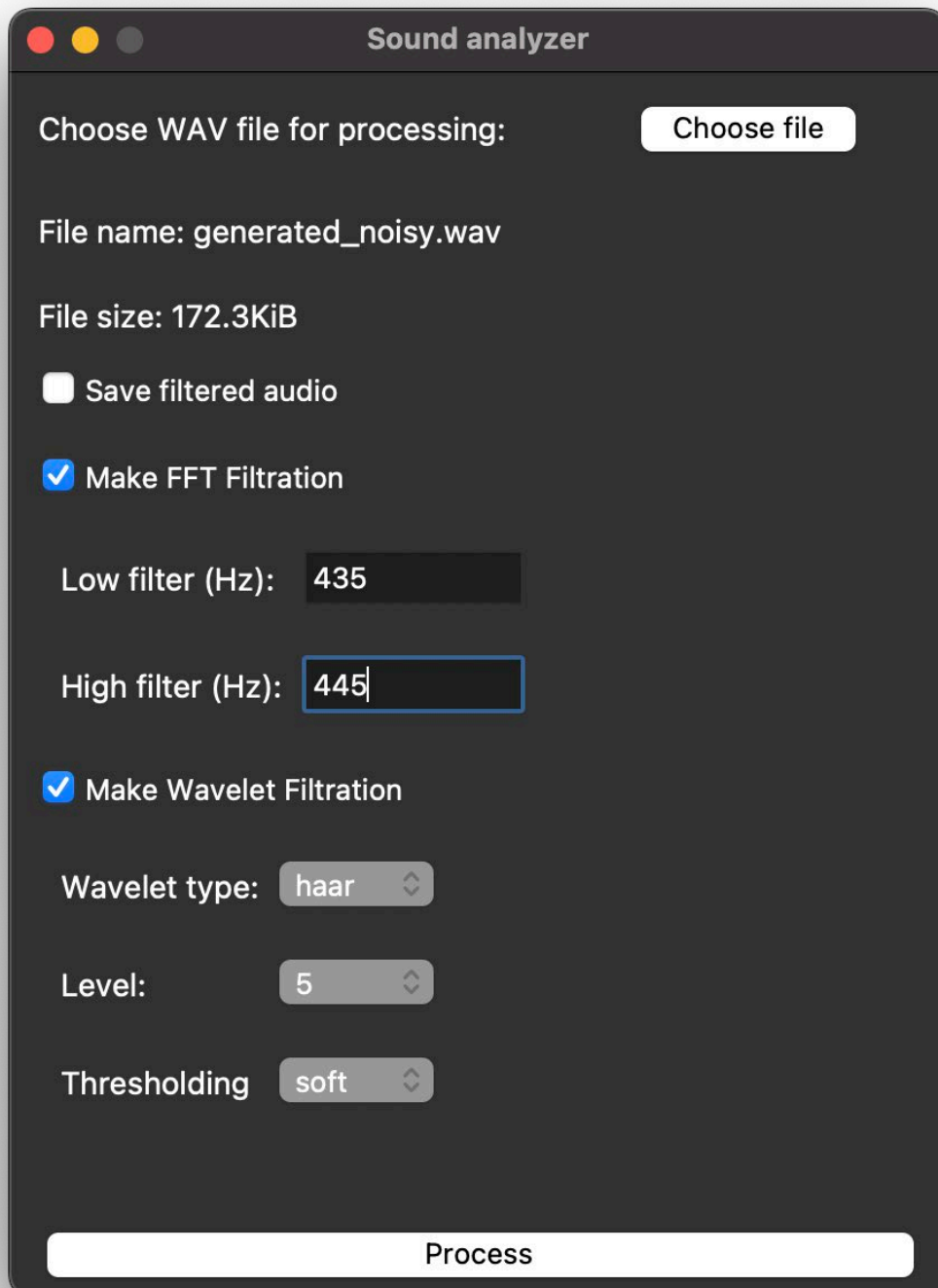


Рисунок 3.6 – Приклад роботи додатку у двох режимах одночасно

Також є можливість зберегти оброблений аудіофайл, увімкнувши відповідну опцію. У нижній частині інтерфейсу розташована кнопка «Process», яка запускає обробку аудіосигналу відповідно до заданих параметрів. Інтерфейс створений таким чином, щоб забезпечити інтуїтивно зрозумілу роботу з додатком і швидкий доступ до всіх функцій. Приклад роботи з додатковою функцією збереження відфільтрованого аудіо файлу зображено на рисунку 3.7.

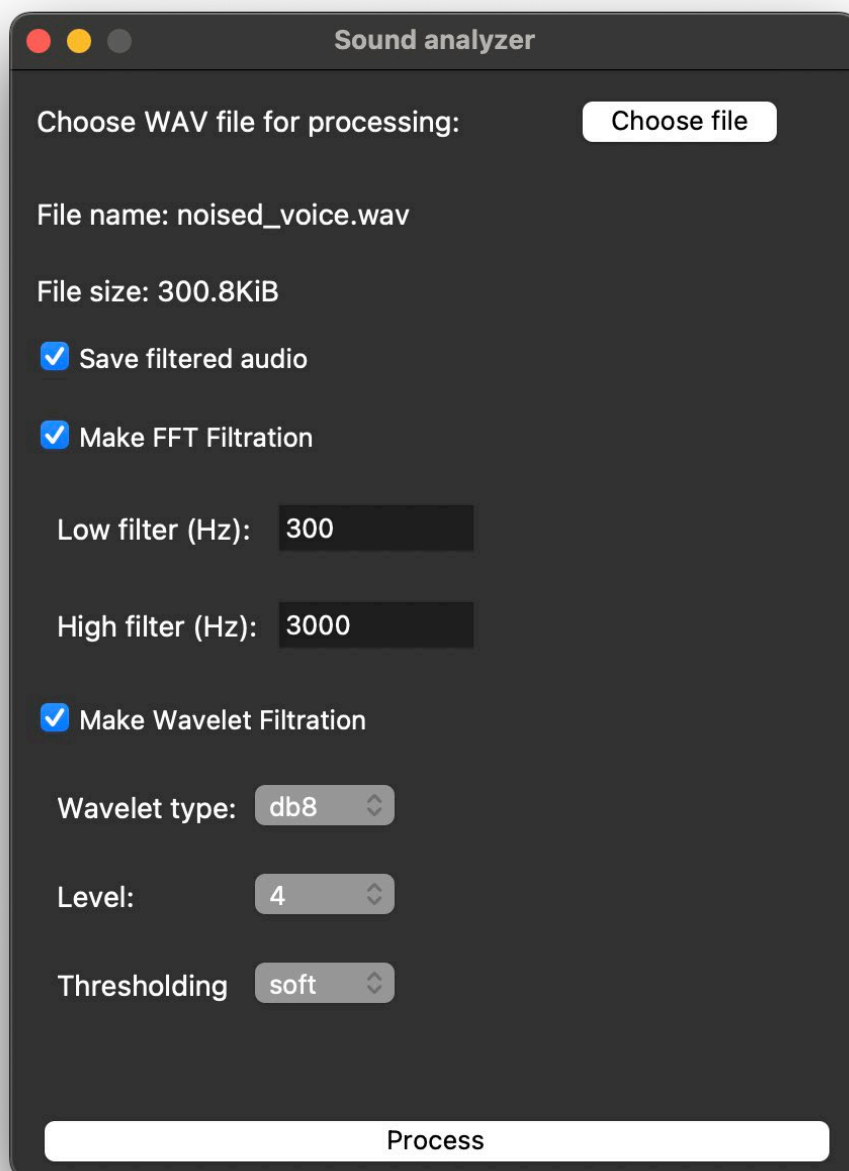


Рисунок 3.7 – Робота додатку у двох режимах одночасно

3.4 Фільтрація аудіофайлу за допомогою швидкого перетворення Фур'є

У режимі фільтрування ШПФ додаток здійснює аналіз та обробку звукового сигналу у частотній області. На рисунку 3.8 зображено результат роботи додатку в режимі ШПФ.

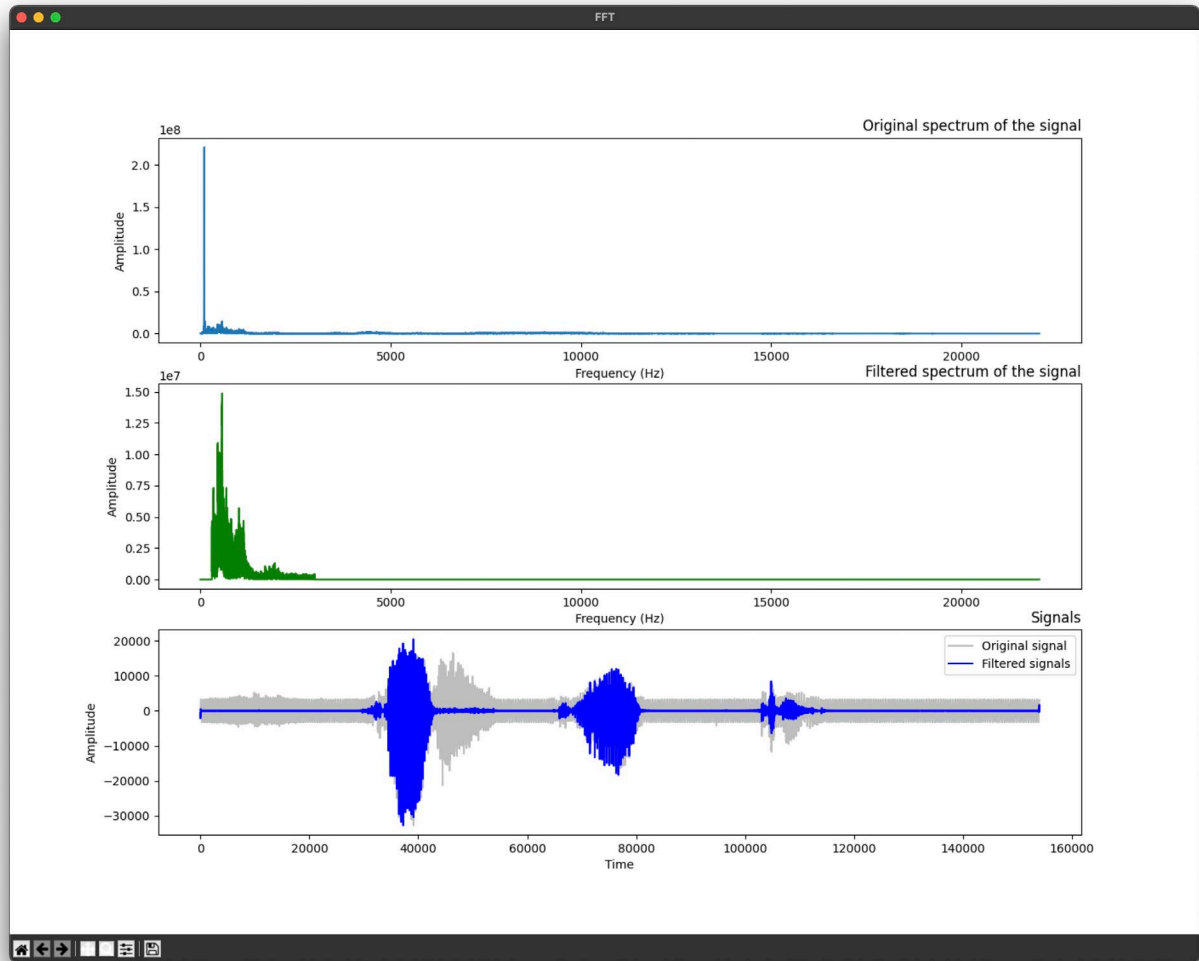


Рисунок 3.8 – Результат роботи у режимі ШПФ фільтрації

Застосовується швидке перетворення Фур'є для переведення сигналу з часової області в частотну. У частотній області виконується відсікання небажаних частот, які виходять за межі вказаного діапазону (наприклад, низькочастотні або високочастотні шуми). Після цього здійснюється зворотне перетворення Фур'є для повернення обробленого сигналу у часову область.

У верхній частині інтерфейсу відображається графік спектру оригінального сигналу. По осі абсцис показана частота (в герцах), а по осі ординат – амплітуда сигналу. Цей графік дозволяє проаналізувати частотні компоненти звуку перед фільтрацією.

На другому графіку (рис. 3.8) відображається спектр сигналу після фільтрації. Помітно, що залишилися лише ті частотні компоненти, які відповідають вибраному діапазону, а небажані частоти були видалені.

На нижньому графіку (рис. 3.8) порівнюється початковий та відфільтрований сигнали. Сірий колір відповідає початковому сигналу, а синій – сигналу після фільтрації. Як бачимо, ця візуалізація дозволяє оцінити вплив фільтрації на структуру звукового сигналу.

Таким чином, інтерфейс забезпечує зрозумілий і наочний аналіз результатів фільтрації, дозволяючи користувачу легко перевірити ефективність обробки.

3.5 Фільтрація аудіофайлу за допомогою вейвлетів

У режимі вейвлет-фільтрації додаток обробляє аудіосигнал, за допомогою вейвлет-перетворення для видалення небажаних шумів. На рисунку 3.9 зображено результат роботи додатку в режимі вейвлет-фільтрації.

Програма виконує розклад сигналу на кілька рівнів за допомогою обраного вейвлету. Небажані компоненти сигналу (шум) визначаються та обробляються пороговою функцією. Після цього програма відновлює сигнал із використанням зворотного вейвлет-перетворення, зменшуючи вплив шуму.

У верхній частині інтерфейсу (рис. 3.9) представлено графік оригінального звукового сигналу у часовій області. Сірий графік демонструє амплітуду сигналу залежно від часу, включаючи наявний шум. Цей графік служить базою для порівняння з результатами фільтрації.

У нижній частині інтерфейсу (рис. 3.9) показаний графік сигналу після фільтрації. Синій графік демонструє очищений від шуму сигнал, зберігаючи

основну структуру та характеристики звуку.

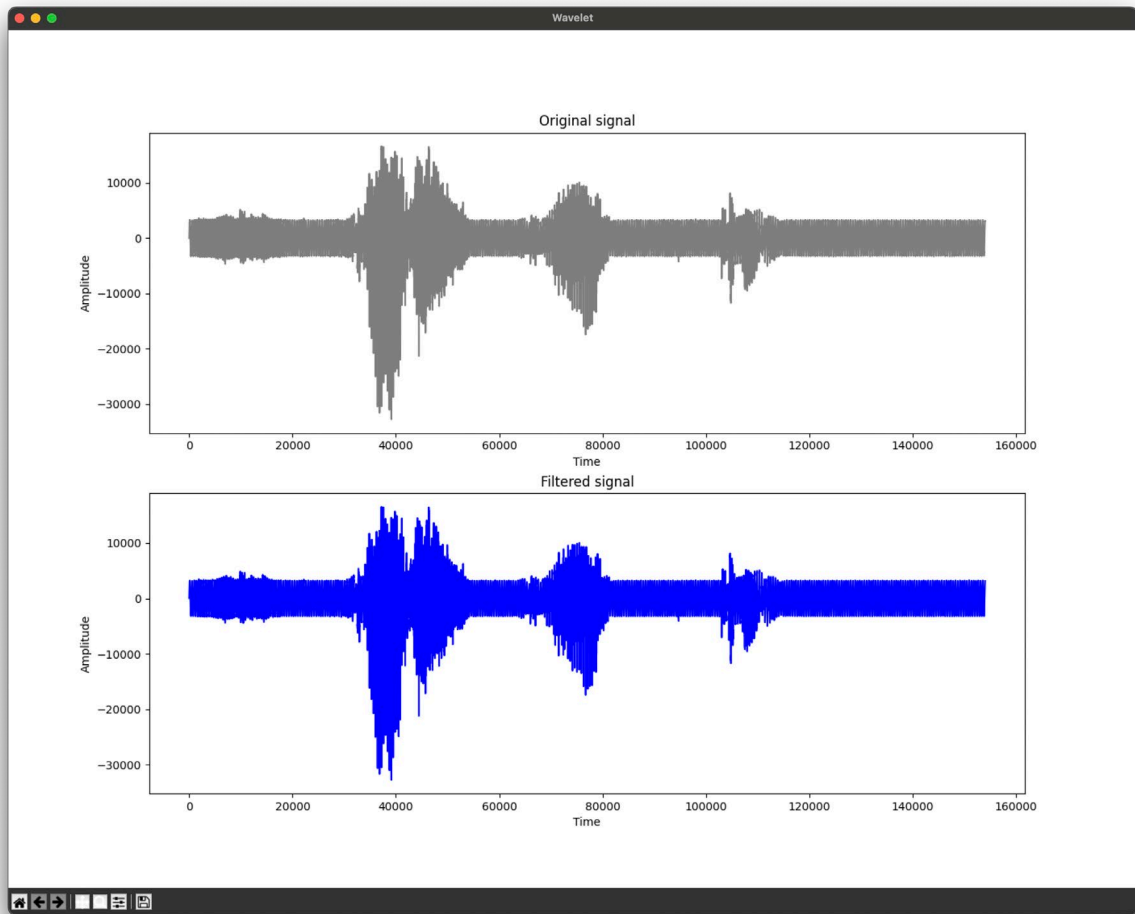


Рисунок 3.9 – Результат роботи додатку у режимі вейвлейт-фільтрації

Результати, відображені на графіках рис. 3.9, показують, як вейвлет-фільтрація ефективно знижує рівень шуму, зберігаючи основний зміст звукового сигналу. Інтерфейс забезпечує простий спосіб візуального аналізу обробки звуку та дозволяє оцінити якість очищення аудіосигналу.

Висновки за розділом 3

У цьому розділі було розроблено програмний додаток який дозволяє робити фільтрацію аудіосигналу за допомогою 2 методів – ШПФ та вейвлет-

фільтрації.

Функціонал додатку реалізує такі основні етапи: завантаження аудіофайлу, обробка аудіосигналу методом ШПФ або вейвлет-фільтрації, виведення результатів та можливість збереження очищеного сигналу. Тестування програми підтвердило її працездатність і гнучкість у налаштуванні параметрів фільтрації для різних типів шуму та сигналів.

Розроблений додаток може бути використаний у практичних задачах, таких як обробка аудіозаписів, шумозаглушення у звукових системах або навчальні експерименти у курсах цифрової обробки сигналів. Його перевагами є простота використання, модульна архітектура та можливість швидкого розширення функціоналу.

Таким чином, у рамках цього розділу було створено ефективний програмний засіб, який відповідає вимогам задачі, і закладено основу для подальших досліджень та вдосконалення методів фільтрації звукових сигналів.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ АНАЛІЗ

4.1 Фільтрація штучно згенерованого сигналу

У цьому підрозділі проведено тестування додатку та аналіз ефективності фільтрації згенерованого звукового сигналу з використанням двох методів: швидкого перетворення Фур'є та вейвлет-фільтрації. Особливу увагу приділено оцінці результатів фільтрації за допомогою метрики SNR [15], яка дозволяє об'єктивно порівняти ефективність обробки.

Для аналізу було згенеровано чистий синусоїдальний сигнал із частотою 440 Гц, що відповідає стандартній музичній ноті «ля». Сигнал є гармонійним і не містить шуму чи спотворень. Потім до цього сигналу було додано шум із частотою 100 Гц, який є стаціонарним низькочастотним шумом. Цей шум був обраний для симуляції типових перешкод, які можуть виникати в аудіозаписах. Графічний приклад згенерованого сигналу наведено на рисунку 4.1.

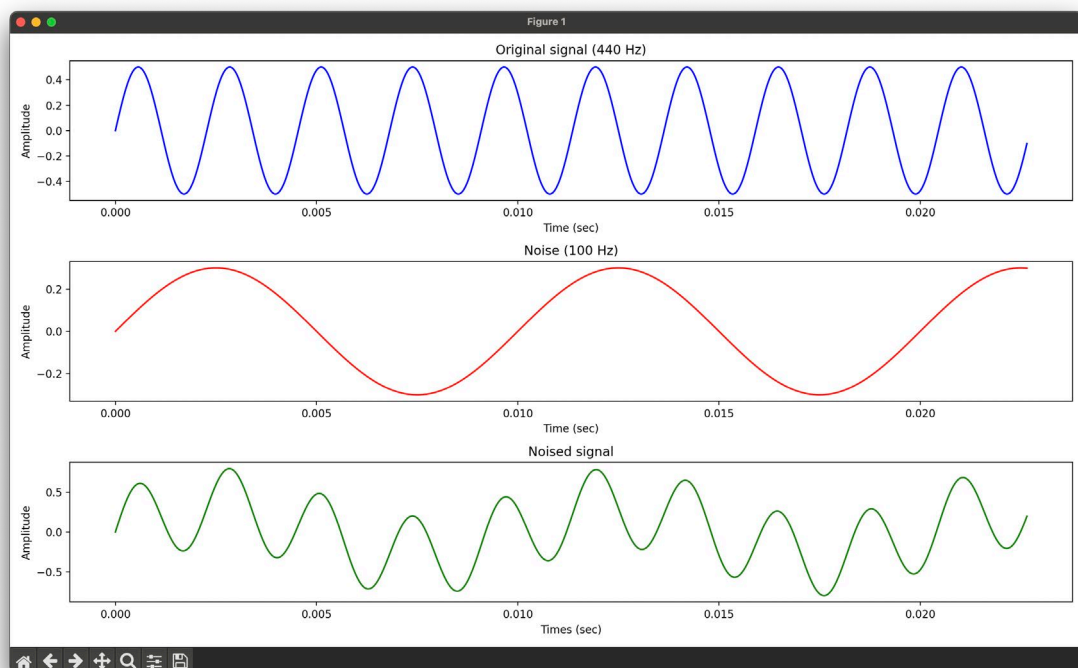


Рисунок 4.1 – Графічний приклад штучно згенерованого аудіосигналу

Фільтрація методом швидкого перетворення Фур'є передбачає перетворення сигналу з часової області у частотну. У частотній області було виділено діапазон частот від 435 Гц до 445 Гц, що охоплює основну частоту корисного сигналу (440 Гц). Інші частоти, включаючи шум 100 Гц, були відфільтровані. Після цього зворотне перетворення повернуло очищений сигнал у часову область. Графічний приклад відфільтрованого сигналу та спектр сигналу наведено на рисунку 4.2.

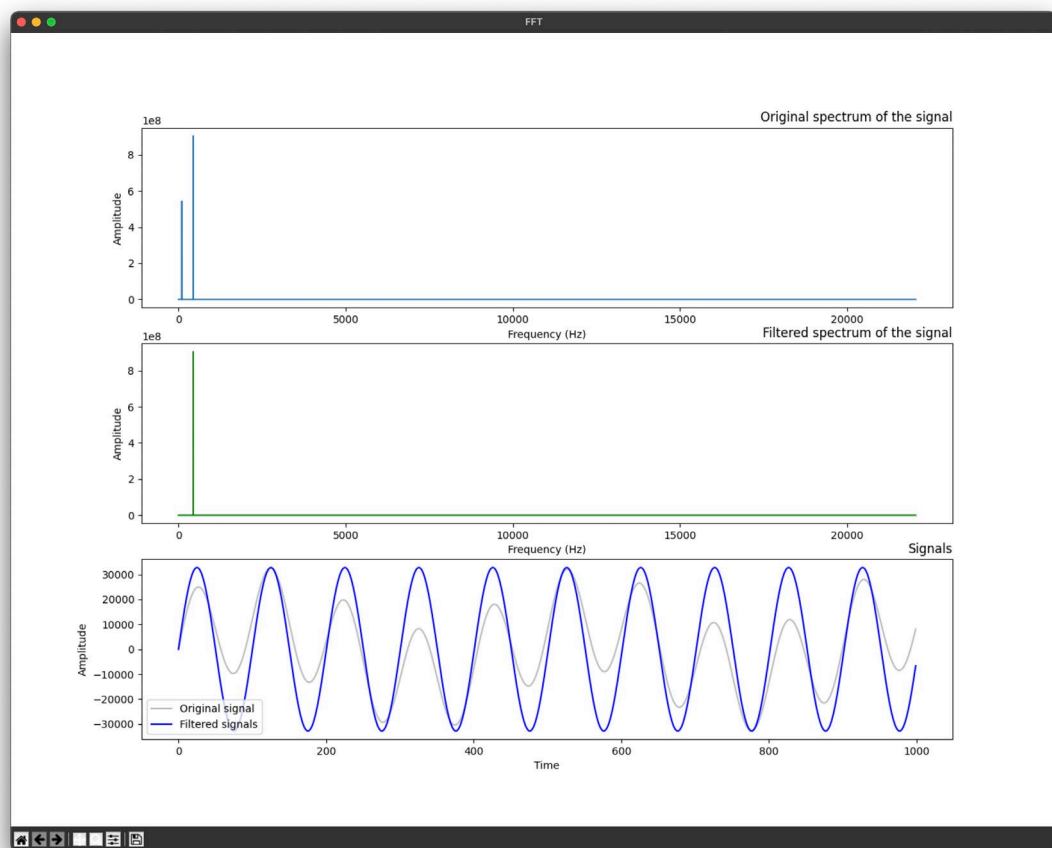


Рисунок 4.2 – Результат ШПФ фільтрації для штучного аудіосигналу

Метод вейвлет-фільтрації передбачає розклад сигналу за допомогою дискретного вейвлет-перетворення. Використовувався вейвлет *db8* [16] з 5 рівнями декомпозиції. Для порогової обробки коефіцієнтів застосовувався м'який поріг (soft thresholding), який допомагає згладити шумові компоненти без значного впливу на корисний сигнал. Графічний приклад відфільтрованого сигналу на-

ведено на рисунку 4.3.

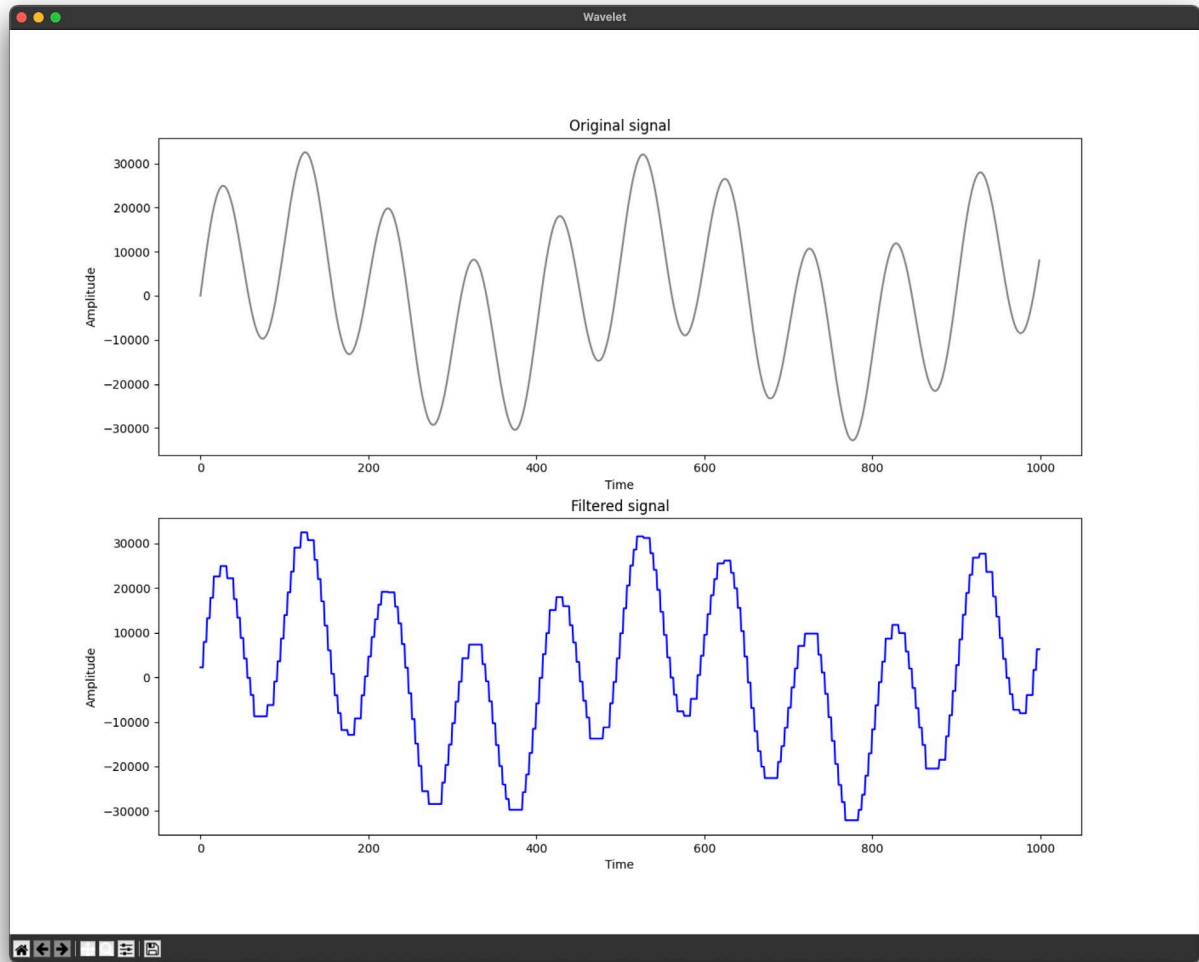


Рисунок 4.3 – Результат вейвлет-фільтрації для штучно згенерованого сигналу

Оцінка результатів фільтрації відбувається за допомогою SNR. SNR (Signal-to-Noise Ratio) – це метрика, яка показує співвідношення між потужністю корисного сигналу та потужністю шуму. Вона дозволяє оцінити, наскільки ефективно методи фільтрації знижують рівень шуму. SNR можна розрахувати за формулою (4.1):

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right), \quad (4.1)$$

де P_{signal} – потужність корисного сигналу;

P_{noise} – потужність залишкового шуму.

У випадку дискретних сигналів потужностей корисного сигналу та шуму обчислюються як середні квадрати значень за формулою (4.2), (4.3) відповідно:

$$P_{signal} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s[i]^2, \quad (4.2)$$

де $s[i]$ – корисний сигнал;

N – кількість виборок;

$$P_{noise} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n[i]^2, \quad (4.3)$$

де $n[i]$ – залишковий шум (різниця між оригінальним сигналом і фільтрованим);

N – кількість виборок.

Після застосування ШПФ фільтрації отримано значення $SNR = 139.62$ дБ. Це вказує на те, що корисний сигнал практично повністю домінує над залишковим шумом [17], а метод зберіг його без значних спотворень. Високе значення SNR свідчить про високу ефективність ШПФ для видалення стаціонарних шумів із точно визначеною частотою.

Для вейвлет-фільтрації значення SNR склало 8.17 дБ, що значно нижче. Це означає, що після фільтрації залишкова потужність шуму залишається суттєвою. Хоча метод видалив частину шуму, він не настільки ефективний, як ШПФ, для сигналів із чітко визначеною частотною складовою шуму.

Результати показують, що метод ШПФ забезпечує значно вищу якість фільтрації порівняно з вейвлет-фільтрацією у випадку обробки сигналу з домінуючим стаціонарним шумом. Високе значення SNR (139.62 дБ) для ШПФ свід-

чить про майже повне усунення шуму. Натомість вейвлет-фільтрація (8.17 дБ) показала обмежену ефективність, що може бути пов'язано з меншим фокусом методу на чітко визначених частотах шуму.

4.2 Фільтрація голосового сигналу з накладеним білим шумом

У цьому підрозділі проведено тестування додатку та аналіз ефективності фільтрації голосового сигналу, забрудненого білим шумом, за допомогою двох методів: ШПФ та вейвлет-фільтрації. Для оцінки якості очищення сигналу використано метрику STOI [18], яка є сучасним підходом для об'єктивного оцінювання розбірливості мовлення.

Для дослідження було записано голосовий сигнал, що містив голосове повідомлення. На цей сигнал накладено білий шум із амплітудою 0.1. Білий шум як рівномірно розподілений у частотному спектрі випадковий сигнал, імітує типові акустичні перешкоди (наприклад, шум вітру чи електроніки). Графічний приклад голосового сигналу на який накладено білий шум наведено на рисунку 4.4.

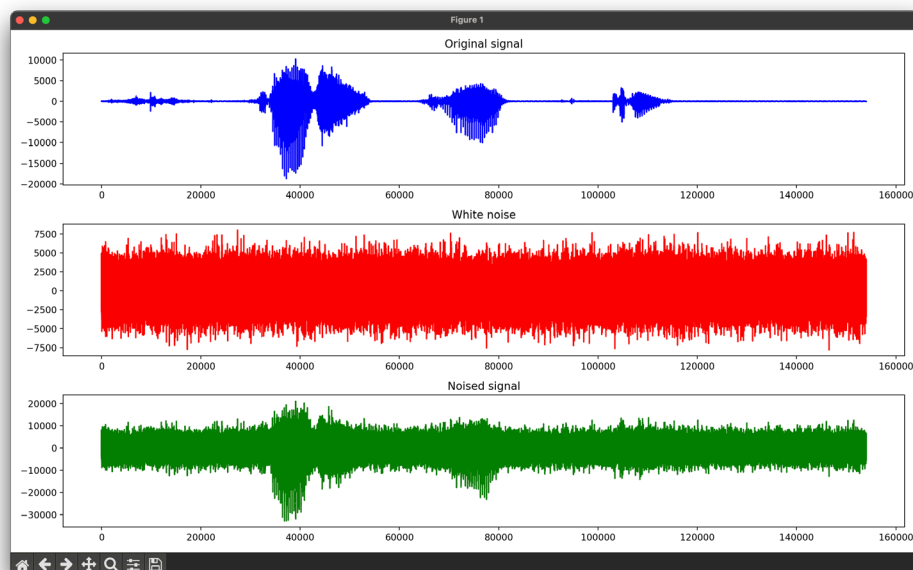


Рисунок 4.4 – Графічний приклад зашумленого голосового аудіосигналу

Швидке перетворення Фур'є дозволяє проаналізувати сигнал у частотній області та видалити частоти, які відповідають шуму. Для очищення використовували діапазон частот від 85 Гц до 185 Гц, що відповідає основним частотним складовим мовлення [19]. Шумові компоненти, які виходили за ці межі, було видалено, а зворотне перетворення повернуло очищений сигнал у часову область. Графічний приклад відфільтрованого голосового сигналу наведено на рисунку 4.5.

Метод вейвлет-фільтрації використовував розклад сигналу за допомогою вейвлету *db8* із 4 рівнями декомпозиції. Порогова обробка коефіцієнтів здійснювалася за допомогою м'якого порогу (*soft thresholding*), що дозволяє згладити шумові компоненти, зберігаючи важливі елементи мовлення. Після цього сигнал було відновлено за допомогою зворотного вейвлет-перетворення. Графічний приклад відфільтрованого голосового сигналу наведено на рисунку 4.6.

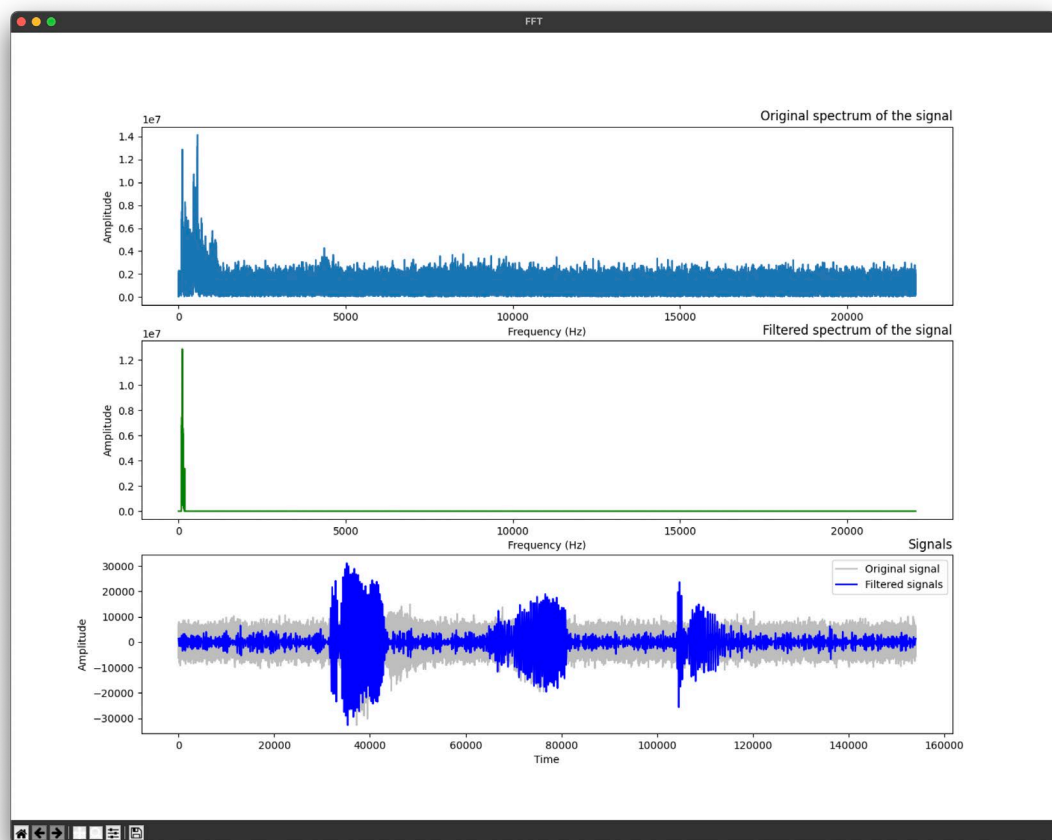


Рисунок 4.5 – Результат фільтрування за допомогою ШПФ

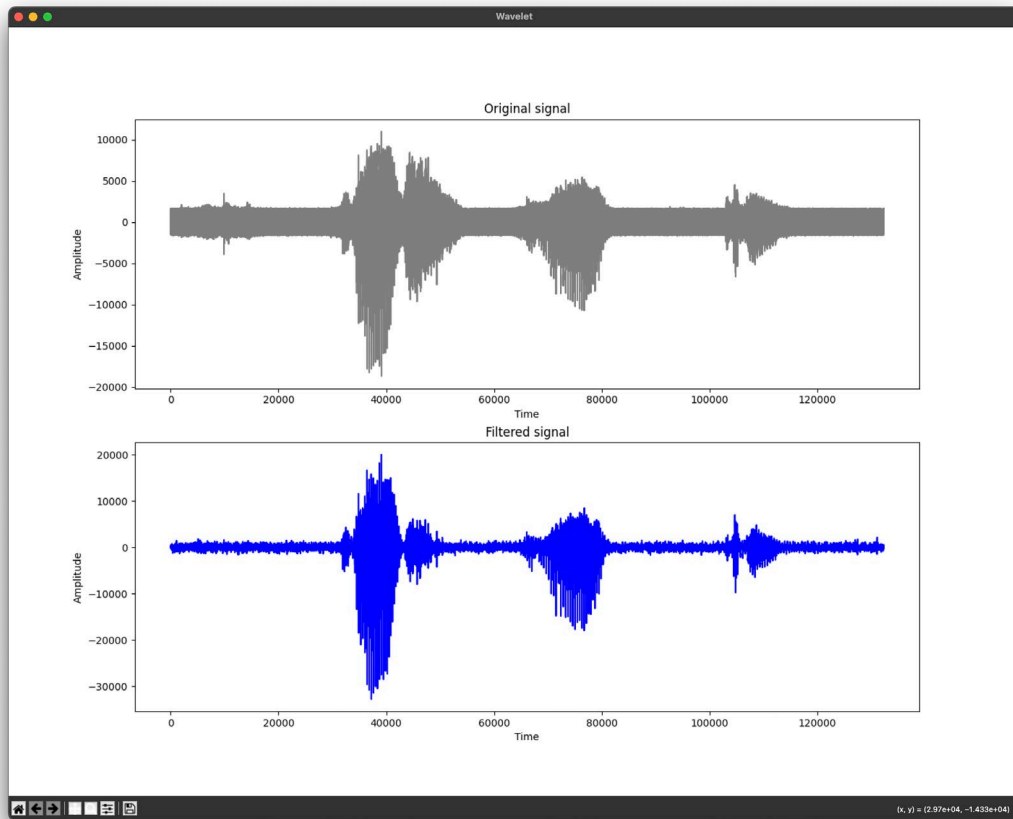


Рисунок 4.6 – Результат фільтрування за допомогою вейвлетів

Оцінка результатів фільтрації відбувається за допомогою STOI. STOI (Short-Time Objective Intelligibility) – це об’єктивна метрика, яка використовується для оцінки розбірливості мовлення після обробки. STOI дозволяє кількісно оцінити якість мовного сигналу, очищеного від шумів, і використовується в багатьох дослідженнях у сфері обробки мовлення. Ця метрика особливо корисна для порівняння різних методів шумозаглушення, коли необхідно зберегти мовний сигнал максимально розбірливим.

STOI працює на основі розподілу сигналу на короткі часові інтервали, що дозволяє оцінювати розбірливість мовлення локально у часовій області. Спершу сигнал розбивається на короткі часові вікна тривалістю приблизно 20мс, кожне з яких аналізується окремо. Після цього оригінальний і оброблений сигнали перетворюються у частотну область, зазвичай за допомогою короткого перетворення Фур’є [20]. Це дозволяє проаналізувати спектральні характеристики сигналів у кожному часовому інтервалі. Далі відбувається порівняння спе-

ктральних компонентів обробленого сигналу з оригінальним для кожного часо-во-частотного блоку. STOI обчислює рівень кореляції між цими компонентами, оцінюючи, наскільки близько оброблений сигнал відповідає оригінальному. Нарешті, результати кореляції для всіх часових вікон усереднюються, щоб отримати єдине значення розбірливості мовлення для всього сигналу. Цей процес забезпечує об'єктивну оцінку, враховуючи часову та частотну локалізацію змін у сигналі, викликаних шумом чи обробкою. Результат роботи STOI варіюється від 0 до 1, де 0 – повна нерозбірливість, оброблений сигнал настільки спотворений, що його неможливо зрозуміти, а 1 – ідеальна розбірливість, сигнал повністю відповідає оригінальному мовному сигналу, без спотворень чи шуму [21].

Результати значень STOI можна інтерпретувати наступним чином:

- 0.7–1.0 – високий рівень розбірливості мовлення;
- 0.5–0.7 – середній рівень розбірливості. Деякі частини мовлення можуть бути важкими для сприйняття;
- 0.0–0.5 – низький рівень розбірливості. Мовлення є важким або неможливим для розуміння.

Після застосування ШПФ фільтрації отримано значення STOI – 0.25, що свідчить про низьку розбірливість мовного сигналу. Це пов'язано з тим, що метод ШПФ зберігає лише основні частоти в обраному діапазоні (85–185 Гц), втрачаючи високочастотні компоненти, які є важливими для сприйняття мовлення.

Для вейвлет-фільтрації значення STOI склало 0.71, що демонструє значно кращу розбірливість мовного сигналу. Вейвлет-фільтрація зберегла часово-частотну структуру мовлення, видаливши шум, але залишивши основні компоненти, необхідні для розуміння мови.

Результати показують, що метод вейвлет-фільтрації є більш ефективним для обробки мовних сигналів із білим шумом. Значення STOI – 0.71, свідчить про те, що сигнал після фільтрації залишився розбірливим. Натомість метод ШПФ, із значенням STOI – 0.25, не забезпечив достатньої якості для розуміння

мови, оскільки його основна мета – фільтрація у частотній області – не враховує часово-частотні характеристики мовного сигналу.

Висновки за розділом 4

В даному розділі було проведено серію обчислювальних експериментів для тестування ефективності методів ШПФ та вейвлет-фільтрації на різних типах сигналів, які містили різні види шуму. Експерименти охоплювали фільтрацію згенерованого синусоїдального сигналу з частотним шумом, голосового сигналу з білим шумом, а також порівняння результатів із використанням об'єктивних метрик, таких як SNR та STOI.

Результати експериментів підтвердили, що кожен із розглянутих методів має свої переваги та обмеження залежно від типу сигналу і природи шуму. Метод ШПФ показав високу ефективність для сигналів із чітко визначеними частотними компонентами. Значення SNR, отримане під час експерименту, досягло 139.62 дБ, що свідчить про майже повне усунення шуму. Однак для голосового сигналу з білим шумом ШПФ виявився менш ефективним, зі значенням STOI лише 0.25, через втрату важливих частотних і часових компонентів мовного сигналу.

Натомість вейвлет-фільтрація, продемонструвала кращі результати для обробки голосового сигналу. Значення STOI для цього методу досягло 0.71, що свідчить про збереження розбірливості мовного сигналу після обробки. Разом із тим, для сигналів із чітко визначеним спектром шуму вейвлет-фільтрація поступається ШПФ через недостатнє видалення низькочастотних компонентів.

Порівняння методів дозволило зробити висновок, що ШПФ є оптимальним для задач із стаціонарними шумами, тоді як вейвлет-фільтрація забезпечує більшу гнучкість для нестаціонарних шумів і сигналів, які потребують збереження часових характеристик. Усі проведені експерименти підтвердили адекватність обраних метрик SNR і STOI для оцінки ефективності фільтрації.

ВИСНОВКИ

У рамках даної роботи було здійснено комплексне дослідження методів фільтрації звукових сигналів для видалення фонових шумів. Основна увага була зосереджена на двох популярних підходах – швидкому перетворенню Фур'є та вейвлет-фільтрації. В рамках роботи було проведено серію експериментів, які дозволили оцінити ефективність цих методів у різних умовах, зокрема під час фільтрації штучно згенерованих сигналів і голосових записів із накладеними шумами.

Результати дослідження свідчать, що метод швидкого перетворення Фур'є показує високу ефективність для фільтрації сигналів із чітко визначеними частотними компонентами шуму. Однак швидке перетворення Фур'є демонструє обмежену ефективність у задачах, пов'язаних із фільтрацією нестационарних шумів або шумів із широким спектром частот. У цих випадках вейвлет-фільтрація виявилася більш гнучкою та здатною зберігати часові й частотні характеристики сигналу.

Отримані результати відповідають сучасному рівню наукових і технічних знань у галузі обробки сигналів. Методи, що були використані у роботі, широко застосовуються у сфері аудіообробки, зокрема для задач шумозаглушення в телекомунікаціях, музичній сфері, медичних приладах та системах розпізнавання мовлення.

Наукова значущість роботи полягає у порівняльному аналізі сучасних методів фільтрації сигналів та обґрунтуванні їх ефективності в різних умовах. З технічної точки зору, розробка універсального інструменту для фільтрації аудіосигналів має практичну цінність у багатьох сферах. Соціально-економічна значущість роботи визначається можливістю зниження впливу шуму на якість життя людей, зокрема в умовах урбанізованих середовищ або при використанні телекомунікаційних технологій.

Подальші дослідження у цій сфері доцільно зосередити на розширенні функціональності розробленого програмного засобу. Це може включати інтег-

рацію більш складних алгоритмів адаптивної фільтрації, використання методів машинного навчання для автоматичної ідентифікації шумів, а також створення мобільних та веб-версій програми. Крім того, перспективним напрямом є дослідження впливу параметрів фільтрації на якість сигналів у реальних умовах та впровадження інструментів для оцінки якості звуку, орієнтованих на суб'єктивне сприйняття людиною.

Таким чином, виконана дипломна робота не лише досягла поставлених цілей, але й відкрила нові напрями для подальших досліджень у галузі обробки звукових сигналів. Отримані результати можуть бути корисними як для практичного використання, так і для розширення наукових знань у цій сфері.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Вельгіщев А. С. Дослідження і порівняння різних методів фільтрації звукових сигналів для видалення фонових шумів. *III Міжнародна науково-практична конференція англійською мовою*: зб. Матеріалів форуму (м. Харків, 08 листопада 2024 р.). Т. 7. Харків : ХНПУ, 2024. С. 249.
2. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Маципура В. Т. Основи акустики. Навчальний посібник. Київ : Наукова думка, 2007. 640 с.
3. Oscillation parameters. URL: https://www.researchgate.net/figure/Oscillation-parameters-Frequency-Number-of-cycles-per-unit-of-time-s-Amplitude_fig2_318456707 (дата звернення 18.10.2024)
4. Signal Processing: Filtering Out The Noise. URL: <https://www.catchpoint.com/blog/signal-vs-noise> (дата звернення 18.10.2024)
5. Попов А. О. Теорія сигналів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 268 с.
6. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing, 1997.
7. Синявська О. О., Слюсарчук П. В. Ряди Фур'є. Навчальний посібник для студентів спеціальностей математика, прикладна математика, статистика. Ужгород, 2015. 70 с.
8. Цифрова обробка аудіо- та відеоінформації у мультимедійних системах: Навчальний посібник / О. В. Дробик, В. В. Кідалов, В. В. Коваль, Б. Я. Костік, В. С. Лазебний, Г. М. Розорінов, Г. О. Сукач. Київ : Наукова думка, 2008. 144 с.
9. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way. 3rd ed. Academic Press, 2008.
10. Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики авіаційних двигунів: монографія [Текст] / Н. І. Бурау, О. М. Павловський, Ю. В. Сопілка, Л. Л. Яцко. Київ : НАУ, 2012. 152 с.
11. Python. URL: <https://www.python.org/> (дата звернення 17.10.2024)

12. PyCharm. URL: <https://www.jetbrains.com/pycharm/> (дата звернення 17.10.2024)
13. Tkinter URL: <https://docs.python.org/3/library/tk.html> (дата звернення 17.10.2024)
14. WAV audio file format URL: <https://docs.fileformat.com/audio/wav/> (дата звернення 17.10.2024)
15. Brandstein M. S., Ward D. B. Estimating Signal-to-Noise Ratio (SNR). *IEEE Signal Processing Magazine*. 2001. Т. 18. № 5. С. 78–92.
16. Попов А. О. Вейвлет-аналіз дискретних сигналів для довільних масштабів. Київ : Наукові вісті НТУУ «КПІ», 2010. № 2. С. 16-22.
17. Czanner G., Ribak D., Freeman A. Measuring the Signal-to-Noise Ratio of a Neuron. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015. Т. 112. № 10. С. 3162–3167.
18. Taal C. H., Hendriks R. C., Heusdens R., & Jensen J. An Algorithm for Intelligibility Prediction of Time–Frequency Weighted Noisy Speech. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2011. № 19(7). С. 2125–2136.
19. Titze I. R. *Principles of Voice Production*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994. 354 с.
20. Процько І. О., Островка Д. В. Аналіз похибки обчислення швидких перетворень класу Фур’є на підставі циклічних згорток. Львів: Науковий вісник НУ «Львівська політехніка», 2020. – С. 81–88.
21. Fang Z., Wang D. A Weighted STOI Intelligibility Metric Based on Mutual Information. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2019. № 27(6). С. 1046–1058.